

Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



Efeito Estruturante das Redes de Transporte no Território
.
Modelo de Análise

Paulo Alexandre Morgado Sousa

Doutoramento em Geografia
Geografia Humana

2010

Universidade de Lisboa

Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



Efeito Estruturante das Redes de Transporte no Território

•
Modelo de Análise

Paulo Alexandre Morgado Sousa

Doutoramento em Geografia

Geografia Humana

Tese orientada pelo Professor Doutor Jorge Manuel Barbosa Gaspar

Esta dissertação integra-se no âmbito da investigação desenvolvida no projecto
FURBS: Forma Urbana Sustentável – Desenvolvimento Metodológico para Portugal
(*FURBS: Sustainable Urban Form – Methodological Approach on Portugal*)
PTDC/GEO/69109 (2006). Coord. CEG-UL

2010

ÍNDICE

| | |
|--|------------|
| Índice de figuras | v |
| Índice de tabelas | viii |
| Resumo | x |
| Abstract | xii |
| | |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Enquadramento | 1 |
| 1.2. Objectivos | 7 |
| 1.3. Opções metodológicas | 8 |
| 1.4. Estrutura da dissertação | 9 |
| | |
| 2. Teoria dos Grafos | 13 |
| 2.1. Conceitos e definições | 15 |
| 2.2. A teoria dos grafos nas ciências geográficas | 23 |
| 2.3. Medidas topológicas e propriedades dos grafos | 34 |
| 2.3.1. Medidas de conectividade e de ligação | 40 |
| 2.3.2. Medidas de acessibilidade e centralidade: Análise de redes pelo cálculo de matrizes | 46 |
| | |
| 3. Redes Complexas | 64 |
| 3.1. A teoria da aleatoriedade | 66 |
| 3.2. A teoria do Mundo pequeno e dos seis graus de separação | 69 |
| 3.3. A dinâmica das redes: O modelo de Watts e Strogatz e o efeito de vizinhança | 73 |
| 3.4. Os <i>Hubs</i> nas redes | 80 |
| 3.5. Redes sem escala | 83 |
| 3.6. Os ricos ficam mais ricos | 86 |
| | |
| 4. Os Sistemas de Informação Geográfica para Transportes (SIG-T) | 88 |
| 4.1. Origens e evolução dos SIG e a emergência dos SIG-T | 91 |
| 4.2. O que se entende por SIG e SIG-T | 100 |
| 4.3. Modelos SIG-T | 109 |
| 4.4. Principais aplicações e tendências dos SIG-T | 111 |
| | |
| 5. Modelo de Análise do efeito estruturante das redes de transportes no território | 121 |
| 5.1. Conceitos fundamentais | 123 |
| 5.2. Conceptualização do modelo | 137 |
| 5.3. Base de dados de <i>features</i> lineares em SIG para a construção do modelo | 140 |
| 5.3.1. 1ª Fase operacional – Rasterização e georreferenciação dos mapas | 143 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.2. 2ª fase operacional - Criação da Base de Dados Geográfica e vectorização das redes e dos nós | 149 |
| 5.3.3. 3ª fase operacional – Conversão da geometria das redes em <i>características</i> topológicas. | 152 |
| 5.4. Implementação do Modelo <i>geo_grafo</i> | 156 |
| 5.4.1. Desenho do programa | 157 |
| 5.4.2. Funcionamento do programa | 159 |
| 5.5. Interface Gráfico do Utilizador (IGU) e <i>Plug-in</i> SIG-T | 162 |
| 6. Análise dos Resultados | 163 |
| 6.1. O Modelo Isotrópico para análise do efeito da rede de transportes rodoviários na organização espacial | 167 |
| 6.2. O Modelo anisotrópico para análise do efeito da rede de transportes rodoviários na organização espacial | 229 |
| 6.2.1. Matriz Ponderada L | 229 |
| 6.2.2. Modelo Gravítico | 248 |
| 6.3. O Problema Mundo pequeno para análise da eficácia e vulnerabilidade da rede de transportes rodoviários | 265 |
| 6.4. Análise comparativa | 280 |
| 7. Considerações Finais | 291 |
| 7.1. A pertinência do modelo: a introdução da componente espacial e a aderência dos resultados à análise geográfica | 291 |
| 7.2. As oportunidades de desenvolvimento do modelo: condições para difusão do modelo e criação de novas funcionalidades de análise | 298 |
| BIBLIOGRAFIA | 302 |
| ANEXOS | 314 |

Índice de figuras

Figuras

| | | |
|----|---|-----|
| 1 | As 7 pontes sobre o Rio Pregel | 14 |
| 2 | Grafo euleriano | 14 |
| 3 | Grafo (G), dos nós $N=\{A, B, C, D\}$, ligados pelos arcos $A=\{\{A,B\}, \{B,C\}, \{B,D\}\}$ | 17 |
| 4 | Grafo não-orientado | 18 |
| 5 | Grafo planar (CHIP) | 19 |
| 6 | Grafo não-planar, com o fluxo de tráfego europeu na internet, 1997 | 19 |
| 7 | Sub-grafo H, do grafo G. | 20 |
| 8 | Fases de desenvolvimento da rede de transportes em Países de fraco desenvolvimento económico. | 29 |
| 9 | Grafo e respectivas matrizes C^1 e C^2 | 51 |
| 10 | Grafo e respectiva matriz de conectividade, C^I | 53 |
| 11 | Grafo e respectiva matriz de distâncias topológicas, D | 54 |
| 12 | Grafo e respectivas matrizes L^1 e L^2 | 60 |
| 13 | Princípio de transição, na teoria da aleatoriedade | 68 |
| 14 | Modelo de Watts e Strogatz e o efeito de vizinhança | 76 |
| 15 | Comparação entre caminho-mais-curto (D) e Coeficiente de <i>clustering</i> (C) | 78 |
| 16 | Gráfico da distribuição do grau dos nós de um grafo aleatório (A) e de um grafo livre de escala (B) | 83 |
| 17 | Exemplo de grafo aleatório <i>versus</i> grafo sem escala | 85 |
| 18 | Evolução cronológica dos SIG relativamente a outros grandes acontecimentos tecnológicos | 90 |
| 19 | Métodos de cartografia automática para o Modelo de Planeamento Urbano de Sines. | 96 |
| 20 | Quatro componentes dos SIG-T | 116 |
| 21 | Níveis de abstracção dos modelos | 125 |
| 22 | Modelo dos modelos | 126 |
| 23 | Relação entre a Geografia e a Ciência computacional | 134 |
| 24 | Blocos do Modelo Conceptual | 138 |
| 25 | Correcção Geométrica de uma imagem pelo método do vizinho mais próximo | 146 |

| | | |
|----|--|-----|
| 26 | Exemplo de erros típicos da vectorização: <i>switch-back</i> ; <i>overshoot</i> e <i>undershoot</i> . | 151 |
| 27 | Estrutura organizativa da topologia na <i>Geodatabase</i> | 153 |
| 28 | Esquema processual síntese do 1º bloco do Modelo conceptual | 155 |
| 29 | Interface do programa criado em VBA sobre o interface de visualização do programa hospedeiro (ArcMap) | 159 |
| 30 | Interface gráfico do ArcMap, para visualização e sobreposição das <i>features</i> de vias (lado esquerdo) e preparação da saída gráfica do mapa temático (lado direito). | 160 |
| 31 | Interface gráfico do ArcCatalog, para construção da geodatabase | 160 |
| 32 | Interface do ArcToolbox, com lista de medidas de distribuição espacial (circulo a encarnado) e visualização dos resultados no visualizador do ArcMap | 161 |
| 33 | Grafo das Estradas Romanas | 170 |
| 34 | Grafo da Rede de Estradas Romanas com identificação dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis calculados a partir da matriz D. | 182 |
| 35 | Grafo com a rede de cidades existentes até ao ano de 1100, e as medidas de distribuição espacial | 186 |
| 36 | Grafo da Rede de Itinerários de Portugal continental em 1800 | 188 |
| 37 | Grafo da Rede de Itinerários com identificação dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis calculados a partir da matriz D. | 193 |
| 38 | Grafo com o sistema de rede urbana existentes até ao ano de 1800, e as medidas de distribuição espacial | 195 |
| 39 | Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1945 | 197 |
| 40 | Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1945 com identificação do <i>grupo</i> dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis, calculados a partir da matriz D | 204 |
| 41 | Grafo com o sistema de rede urbana existente até ao ano de 1945, e as medidas de distribuição espacial | 206 |
| 42 | Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1985 | 208 |
| 43 | Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1985, com identificação do <i>cluster</i> dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis, calculados a partir da matriz D | 214 |
| 44 | Grafo com o sistema de rede urbana existente ao ano de 1985, e as medidas de distribuição espacial | 216 |
| 45 | Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 2000 | 219 |
| 50 | Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental 2000 com identificação do <i>cluster</i> dos lugares mais e menos acessíveis calculados a partir da matriz D. | 225 |
| 51 | Grafo com o sistema de rede urbana existente até ao ano de 2000, e as medidas de distribuição espacial | 227 |
| 52 | Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede de Estradas Romanas, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L^{42} (direita). | 232 |
| 53 | Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede de Itinerários 1800, pela | 235 |

| | | |
|----|--|-----|
| | matriz D (esquerda) e pela matriz L^{31} (direita). | |
| 54 | Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede do PRN45, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L^{37} (direita). | 239 |
| 55 | Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede do PRN85, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L^{35} (direita). | 241 |
| 56 | Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede do PRN2000, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L^{26} (direita). | 245 |
| 57 | Potencial de Interação dos lugares da Rede do PRN45 | 254 |
| 58 | Potencial de Interação dos lugares da Rede do PRN85 | 258 |
| 59 | Potencial de Interação dos lugares da Rede do PRN2000 | 262 |
| 60 | Evolução das Propriedades ‘Mundo pequeno, para a Rede de Estradas de Portugal continental | 268 |
| 61 | Grafo da Rede de estradas Romanas com identificação dos lugares com mais grau de intermediação | 271 |
| 62 | Grafo da Rede de Itinerários de 1800, com identificação dos lugares com mais grau de intermediação | 273 |
| 63 | Grafo do PRN45, com identificação dos lugares com mais grau de intermediação | 275 |
| 64 | Grafo do PRN85, com identificação dos lugares com mais grau de intermediação | 277 |
| 65 | Grafo do PRN2000, com identificação dos lugares com mais grau de intermediação | 279 |
| 66 | Evolução dos índices estruturais e de conectividade das Redes de Estradas de Portugal continental | 282 |
| 67 | Medidas territoriais: lugares mais centrais e elipses de tendência, para os Grafos das redes de estradas, desde o período Romano ao PRN2000. | |

Índice de tabelas

Tabelas

| | | |
|----|--|-----|
| 1 | Síntese dos Modelos de Interação espacial em Geografia | 26 |
| 2 | Quadro síntese de medidas de conectividade para exploração da topologia da rede de transportes | 46 |
| 3 | Funções SIG utilizadas nas diferentes fases dos modelos sequenciais de transportes | 118 |
| 4 | Métodos para georreferenciação de imagens | 145 |
| 5 | Erro aproximado segundo a escala e o número de pontos de controlo | 147 |
| 6 | Síntese do Métodos e processos de georreferenciação | 148 |
| 7 | Módulos que estruturam o algoritmo utilizado | 158 |
| 8 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de conectividade C^1 da rede de Estradas Romanas | 173 |
| 9 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de conectividade C^{42} da rede de Estradas Romanas | 175 |
| 10 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidades T^{42} da rede de Estradas Romanas | 177 |
| 11 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidades D da rede de Estradas Romanas | 179 |
| 12 | Comparação das hierarquias da rede de lugares, obtidas a partir das Matrizes C^{42} , T^{42} e D da rede de Estradas Romanas | 181 |
| 13 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Itinerários, 1800 | 192 |
| 14 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Estradas do Plano rodoviário de 1945 | 203 |
| 15 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Estradas do Plano rodoviário nacional de 1985 | 213 |
| 16 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Estradas do Plano rodoviário nacional de 2000 | 223 |
| 17 | Leitura comparativa dos lugares de maior acessibilidade pelas medidas territoriais e topológicas, desde os Romanos até ao PRN2000 | 228 |
| 18 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidades L^{42} da rede de Estradas Romanas. | 231 |
| 19 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L^{31} da rede de Itinerários, 1800 | 234 |
| 20 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L^{37} do PRN45 | 237 |
| 21 | Comparação da hierarquia dos 7 lugares que estão simultaneamente entre os mais acessíveis, quer a partir da Matriz D, quer da Matriz L^{37} , do PRN45 | 240 |
| 22 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L^{35} do PRN85 | 243 |
| 23 | Comparação da hierarquia dos 4 lugares que estão simultaneamente entre os | 244 |

| | | |
|----|---|-----|
| | mais acessíveis, quer a partir da Matriz D, quer da Matriz L ³⁵ , do PRN85 | |
| 24 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L ²⁶ do PRN2000 | 247 |
| 25 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz P do PRN45 | 256 |
| 26 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz P do PRN85 | 260 |
| 27 | Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz P do PRN2000 | 263 |
| 28 | Medidas Mundo pequeno: Coeficiente de <i>cluster's</i> e Distâncias mais-curtas | 268 |
| 29 | Lugares com maior grau de intermediação, segundo as Estradas Romanas | 270 |
| 30 | Lugares com maior grau de intermediação, segundo Rede de Itinerários de 1800 | 272 |
| 31 | Lugares com maior grau de intermediação, segundo o PRN45 | 274 |
| 32 | Lugares com maior grau de intermediação, segundo o PRN85 | 276 |
| 33 | Lugares com maior grau de intermediação, segundo o PRN2000 | 278 |
| 34 | Valores das medidas estruturais e de conectividade para as Redes de estradas de Portugal continental. | 281 |
| 35 | Lugares com maiores índices das medidas acessibilidade e centralidade para as Redes de estradas de Portugal continental. | 284 |
| 36 | Leitura comparativa dos lugares de maior acessibilidade pelas medidas territoriais e topológicas, desde os Romanos até ao PRN2000 | 287 |

Resumo

Palavras-chave: Teoria dos Grafos; Redes Complexas; SIG-T; modelação e geocomputação.

As Redes de transportes sempre estruturaram o território. Desde as estradas e aquedutos romanos, passando pelos canais de navegação, os caminhos-de-ferro, a electricidade, as estradas de *macadame*, até à internet de banda larga, que as redes de transporte configuram o território dilatando-o ou comprimindo-o, determinando a forma como as actividades se distribuem, o território se organiza, as fronteiras se definem e criando uma nova tipologia de espaços: espaços de fluxos e de conexões.

Mas não são apenas novas tipologias de espaços que surgem à medida que as redes de transportes se reconfiguram ao longo do tempo. Também a topologia das redes sofre modificações, mais propriamente a estrutura de nós e arcos sofre transformações. Para tentar medir e avaliar as características das redes e da influência que exercem no território, e em particular nas relações entre os lugares, esta dissertação propõe um novo modelo de análise de redes, de base matemática e geográfica, com métricas provenientes da Teoria dos Grafos (medidas de conectividade e medidas de acessibilidade) e das Redes Complexas (Mundo pequeno, coeficiente de *clustering* e índice de Freeman ou grau de intermediação).

Face à crescente complexidade dos sistemas e aos padrões territoriais emergentes, as teorias, os modelos e as técnicas clássicas e analógicas deixaram de conseguir dar uma resposta adequada, quer pela excessiva simplicidade da realidade que consagram (Wilson, 2000), quer pela ausência da dinâmica e da anisotropia do espaço nos processos transformativos dos sistemas. Para respostas mais eficazes são precisos modelos que incluam métodos mais evoluídos e para isso é fundamental o recurso à geocomputação (Openshaw, 1995/97). Os recentes avanços na capacidade de processamento dos computadores e nas técnicas de modelação computacional forneceram, os meios para modelar e compreender os problemas mais difíceis de complexidade organizada (Longley, 1999).

O modelo criado nesta dissertação é um produto da geocomputação. Trata-se de um modelo Sistema de Informação Geográfica para Transportes (SIG-T), que se designou de *geo-grafo* e que usa como hospedeiro o interface gráfico do mais popular e comercial programa de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) – ArcGIS -, mas que pode ‘correr’ em qualquer outro programa SIG que aceite a linguagem de programação (LP) *Visual Basic for Applications* (VBA).

Abstract

Key-words: Graph Theory; Complex networks; GIS-T; Modelling; Geocomputation.

Networks structure the territory. From the roman roads and aqueducts through the river channels, the railway, the *macadame* roadway, to the electricity and broadband internet, networks have always, one way or the other, provided the blueprint for development. Networks have the ability to compress or stretch the territory, influence the way activities spread over the landscape and control how the territory organizes itself and create new types of spaces: flow and connectivity spaces.

Through time, not only new types of spaces emerge with the development of transport networks, but also network topologies, namely nodes and arcs, experience transformations. This thesis uses Graph-based modelling for the analysis of network topology in order to measure and evaluate the characteristics of networks and their influence on the territory, e.g. the way places connect to each other.

Due to the increasing complexity of systems and emergent spatial patterns, classic models based on isotropic space are no longer capable of efficiently represent reality (Wilson, 2000). Recent advances in technologies, computing and methods of spatial analysis have allowed the development of advanced spatial analysis methods and geocomputation tools, which are required to provide more realistic models capable of understanding highly organized complexity

In this thesis, a graph-based model (*geo_grafo*) was developed as a geocomputation product and stands as a GIS-T program. It runs on any GIS platform that uses Visual Basic for Applications (VBA) programming language. It only uses the graphic user interface and the georeferencing and relational databases, present in all GIS softwares.

Agradecimentos

Uma dissertação é sem dúvida um trabalho solitário, mas é impossível fazer-se sem a troca de ideias com outros, as conversas com os colegas, os conselhos dos mais sábios ou experientes e o apoio e a compreensão dos amigos e da família.

Assim, desenganam-se os que abraçaram esta empreitada só agora, ou estão a iniciar os seus trabalhos. Peçam opinião a outros, façam perguntas permanentemente, a si próprios e aos outros, escutem todos os conselhos, analisem todas as opiniões e, sobretudo, não tenham medo de errar. Arrisquem. Aprendam.

A maior riqueza que se retirou desta dissertação foi a aprendizagem. Dos modelos clássicos da fundação da Geografia teórica e quantitativa, às mais recentes teorias científicas; da Teoria dos Grafos às Redes Complexas; da Geografia humana de Orlando Ribeiro à geocomputação; dos documentos históricos, à Primeira Lei de Tobler; dos primeiros mapas continentais de Portugal aos Sistemas de Informação Geográfica, muitos foram os temas consultados, muitos foram os documentos lidos, muitos foram os exercícios experimentados e, por fim, algum foi o conhecimento adquirido e realizado.

A dissertação que se apresenta é da responsabilidade do autor, mas não teria sido possível sem o contributo recebido de muitas pessoas. Mesmo correndo o risco de esquecer-se ou omitir-se alguém, é apenas justo mencionar nomes. Das pessoas a mencionar, tenho obrigação de destacar duas: Agradeço em primeiro lugar e muito especialmente ao Professor Jorge Gaspar, não apenas por ser orientador da dissertação, mas pela generosidade e honestidade científica que demonstrou, pela frontalidade das suas opiniões, pela disponibilidade apresentada (verifiquei muitas vezes que a minha dissertação foi para si prioritária entre os seus inúmeros afazeres e diversas solicitações) e sobretudo, pela sua tolerância e postura liberal permitiu a realização desta dissertação.

Expresso também um especial agradecimento ao Professor José António Tenedório, não só pela disponibilidade para discutir estes assuntos e pelas opiniões sempre úteis, mas sobretudo pelo papel preponderante que teve na minha formação científica, académica e gosto que adquiri pela Geografia.

Ao Engenheiro António Gonçalves, experiente programador com conhecimentos geográficos que tive o prazer de conhecer em 1998, quando trabalhávamos ambos no Centro Nacional de Informação Geográfica (CNIG), agradeço ajuda imprescindível na programação do modelo *geo_grafo* e todos os ensinamentos passados.

Agradeço também ao Centro de Estudos Geográficos, do qual faço parte como investigador desde 2002, e ao núcleo de investigação Modelação, Ordenamento e Planeamento Territorial (MOPT) a que pertenço desde a sua criação em 2009, e ao abrigo do qual foi desenvolvida esta dissertação (mais propriamente no âmbito do projecto de investigação FURBS – Forma Urbana Sustentável. Desenvolvimento metodológico para Portugal). A todos, colegas e funcionários inclusive, o meu muito obrigado pelo apoio institucional, pelo incentivo e disponibilidade apresentada.

Ao Professor Diogo de Abreu, director do Centro de Estudos Geográficos, um especial agradecimento pelos ensinamentos prestados. Às minhas questões, mesmo as mais impertinentes, respondeu sempre com generosidade científica, tirando tempo para explicar o seu ponto de vista com exemplos práticos, ora recorrendo simplesmente ao cálculo e desenho sobre papel, ora experimentando hipóteses levantadas, na máquina fazendo uso das suas capacidades de programador experimentado dando exemplos em *Fortran*. Do tempo que me concedeu para discutir as minhas ideias, entre os seus inúmeros afazeres como director do CEG, docente, investigador principal, consultor, espeleólogo, autarca, etc., etc., via-se que para ele era um pequeno prazer científico, e para mim uma enorme fonte de conhecimentos.

Ao Professor Nuno Marques da Costa, pela amizade sempre manifestada e o apoio dado em todas as fases de realização desta dissertação. Sempre disponível para ouvir, sempre com uma palavra de apoio, sempre com tempo para ler e emitir opinião. O seu apoio foi, em muitas etapas, fundamental.

Também uma palavra especial de agradecimento para o amigo de sempre, o Dr. Jorge Rocha. Colegas desde os bancos da faculdade, continuamos a colaborar cientificamente e de forma ininterrupta desde os últimos 15 anos, e a partilhar muitos sucessos e também alguns insucessos, mas sempre preservando a amizade e aprendendo um com o outro.

À Professora Eduarda Marques da Costa, coordenadora do núcleo de investigação MOPT, pelo incentivo permanente, sugestões e total disponibilidade para ouvir. A sua energia, dedicação e o rigor que impõe ao MOPT é para todos uma fonte de motivação, que teve impacto na realização desta dissertação.

À Professora Patrícia Abrantes e ao Dr. Américo Reis, colegas de gabinete e do MOPT, o meu agradecimento pelo espírito de camaradagem mostrado. A Patrícia pelo apoio na revisão bibliográfica e ao Américo pela muitas horas de trabalho que teve de acarretar, para que eu pudesse dedicar-me à dissertação. Foi uma ajuda fundamental na fase final da dissertação.

À amiga, Professora Rute Costa, do Departamento de Linguística da Universidade Nova de Lisboa, sou credor da revisão de texto e da correcção do português. Vi, pelas suas notas - que a minha escrita apressada -, que lhe dei algum trabalho.

Por último, um agradecimento à instituição e às pessoas que me ajudaram a perceber o tipo de dissertação que gostava de fazer. Ao *Centre for Advanced Spatial Analysis* (CASA) da *University College London* (UCL), ao Professor Michael Batty (director do CASA), e à Professora Joana Simões, muito obrigado por me terem recebido para um curto estágio no CASA e pelos ensinamentos prestados. Foram determinantes.

Por fim, às empresas de estudos de transportes TIS.pt – Consultores em Transportes, Inovação e Sistemas S.A e à ENGIMIND – Mobility and Transport Consultants, que me atenderam e disponibilizaram informação. À Estradas de Portugal S.A. e à Direcção Geral de Transportes Terrestres, agradeço o serviço público prestado pelas suas bibliotecas e os arquivos que preservam e deixam consultar.

1. Introdução

1.1. Enquadramento

As redes são onnipresentes nas nossas vidas (Barabási, 2003). Desde as redes sociais, as redes empresariais, as redes de internet até às redes físicas, como as redes rodoviárias e ferroviárias, as redes constituem uma forma universal de representar diversos fenómenos da realidade, com ou sem expressão espacial.

Do ponto de vista geográfico, são as redes de transporte, e a sua relação com o território, as redes que são objecto de estudo desta dissertação. Conscientes de que o desenvolvimento das redes de transporte ampliam a difusão do conhecimento, e consequentemente proporcionam o desenvolvimento das sociedades (Ascher, 2001), os geógrafos sempre procuraram formas para determinar as influências e medir o efeito que estas exercem sobre no território, tanto ao nível da organização social e económica, como ao nível da organização espacial e do ambiente.

Desde que Ullman (1954) elegeu, no seu artigo “Geography as Spatial Interaction¹”, os transportes como o instrumento preferencial para interagir com o Meio (Black, 2003), que muitos cientistas têm dedicado os seus estudos aos transportes e aos processos resultantes. Contudo, só a partir da década de 1960 (Kansky, 1963), é que os geógrafos dão mostras de maior interesse no estudo acerca da estrutura das redes de

¹ William Black, no seu livro “Transportation. A Geography Analysis”, aponta este artigo de Ullman como o ponto de partida para a criação em Geografia, dum novo ramo de interesse dedicado à investigação sobre os transportes: A Geografia dos Transportes. “Ullman saw the field of transport geography as the definitive center of the field of geography. He believed that it was the manner in which humans interact with their world – their spatial interaction – that defined the field.” (2003:4)

transporte, e sua implicação no território, a partir de uma base matemática.

Apesar de estimulantes e úteis do ponto de vista teórico estes estudos não tiveram continuidade, quer devido a um limitado acesso à informação e rudimentares recursos computacionais, quer devido a um desinteresse dos geógrafos que preteriram esta temática por outros tópicos e outras metodologias (Gastner e Newman, 2006).

Só mais recentemente (década de 1990), e por iniciativa dos físicos, é que os modelos de análise de redes são retomados (Newman, 2003), e dos quais resultou uma nova forma de estudar e perspectivar o mundo, a que alguns autores (Dorogovtsev e Mendes, 2003; Barabási, 2003: 6-8; Bersini, 2005) designaram de Ciência das Redes Complexas.

Uma das teorias mais populares da Ciência das Redes Complexas é a teoria do *Mundo pequeno*, também conhecida pela teoria dos ‘seis graus de separação’ e que, de uma forma geral, significa que uma pessoa está, em média, ligada a qualquer outra pessoa no mundo, por intermédio de apenas seis pessoas (Watts, 2004).

Apesar de haver um consenso no mundo científico sobre o quanto esta é uma ciência promissora (Watts e Strogatz, 1998; Barabási, 2003; Dorogovtsev e Mendes, 2003; Bersini, 2005), da perspectiva daqueles que se dedicam ao estudo das redes geográficas (como as redes rodoviárias e as redes ferroviárias), as teorias das Redes Complexas estavam a esquecer-se de uma variável fundamental: a variável espaço, ou seja, os arcos e os nós das redes não têm qualquer referência espacial; localizam-se num espaço abstracto, não obstante serem redes reais com implantação no território, ignorando assim o facto de a sua disposição espacial poder influenciar a sua estrutura e vice-versa (Gastner e Newman, 2006; Batty, 2001). Este é um problema de análise, que o modelo *geo_grafo* proposto nesta dissertação procurou dar uma contribuição para a sua resolução (cf. cap. 5).

As redes de transporte são as redes que mais influência exercem sobre o território (Taylor, 2004), mais precisamente sobre a forma com o território está organizado e as suas componentes se articulam e se relacionam, conforme o provam o crescente número de publicações (livros, artigos em revistas e jornais, artigos nas actas

das conferências, entre outros) sobre elas, e em que se pode verificar a existência de modelos de base matemática, mas com uma componente geográfica, a serem propostos (Dominique, 1998; Zan, 1998; O’Sullivan, 2000; Batty, 2001; Newman, 2003; Gorman, 2003; Kuby *et al*, 2005; Gastner e Newman, 2006; Jiang, 2006; Xu, 2007).

A acção do Homem sobre o território é algo inato, um reflexo biológico, se considerarmos o Homem como um organismo, o mais poderoso, no que respeita à capacidade de modificar o funcionamento de ecossistemas (Odum, 1988). Todavia, esta relação do Homem com o território não é unidireccional. Na verdade, trata-se sobretudo duma inter-relação, na qual o Homem transforma o território, quer por um acto de intuição natural, quer por necessidade adaptativa, e o território molda o Homem, quer condicionando as suas acções, quer definindo o seu modo de vida. Desta relação, resultam dois tipos de interacções: as interacções positivas e as interacções negativas. As interacções positivas, vistas na óptica das teorias actuais, são o que se designa por ordenamento do território², enquanto as interacções negativas, são o seu oposto, isto é, podem ser interpretadas como estados de desequilíbrio, de desordem e consequentemente de instabilidade entre os fenómenos que constituem o território, enquanto sistema complexo.

Para se poder travar estes resultados negativos e potenciar os positivos, já não basta o exercício do ordenamento assente numa metodologia baseada no desenho de um conjunto de ideias fraccionadas, sob a forma de mapas. A modelação, a análise inter-sistémica e holística - suportada por métodos evoluídos na gestão da informação e análise espacial -, e a computação constituem as componentes metodológicas.

A modelação e a geocomputação são a fundação para o desenvolvimento de novas teorias e para a compreensão das actuais e futuras realidades territoriais (Wilson, 2000). Os modelos podem ser informais (verbais) ou formais (matemáticos e

² A Carta Europeia do Ordenamento do Território define ordenamento do território como “... a expressão espacial das políticas económica, social, cultural e ecológica de toda a sociedade. Ele é simultaneamente uma disciplina científica, uma técnica administrativa e uma política concebida como uma aproximação interdisciplinar e global tendente ao desenvolvimento equilibrado das regiões e à organização física do espaço segundo uma concepção directora” (CONSELHO DA EUROPA, 1984:6).

estatísticos), conceptuais (descritivos) e físicos (analíticos e de simulação); mas implicam sempre o ‘saber fazer’.

Esta dissertação é de teor predominantemente metodológico e resulta de uma investigação teórica e aplicada, orientada para o ordenamento do território. Mais especificamente, esta dissertação tem dois objectivos fundamentais: 1) criar um modelo que sirva de instrumento aos analistas, concedendo-lhes as métricas necessárias à fundamentação científica dos seus conceitos, ideias e teses e contribuir para a literatura de referência, incrementado a discussão acerca das características das redes em geral, e do papel das redes de transporte no território, em particular no domínio da Geografia; e 2) constituir-se como um instrumento de apoio à tomada de decisão dos agentes que intervêm no território.

Tal como tem sido defendido (Haggett e Chorley, 1967, 1969; Dalton, 1973; Worboys, 1998; Fotheringham, 1999, 2002; Wilson, 2000; Haggett, 2001; Gaspar, 1981), o recurso aos modelos em ciência é uma obrigatoriedade, e é tão fundamental quanto o conhecimento teórico dos factos. Quer a nível do ensino, quer ao nível da investigação, os modelos constituem instrumentos para a exploração e criação de conhecimento.

Da leitura da bibliografia da especialidade podemos encontrar dois tipos de situações:

- As situações denominador-comum – apresentação da tese de que as redes de transportes são identificadas frequentemente como causa estruturante da configuração territorial (Haggett; Chorley, 1969), fruto das transformações que induzem no espaço e na distribuição das actividades humanas (Kansky, 1963; Peters, 1998);
- As situações desviantes – aquelas cuja manifestação se verifica a dois níveis diferentes:

1. Ao nível do tipo de abordagem ao tema - trabalhos de índole analítica, com um teor mais descritivo e histórico (Cortesão, 1964;

Matos, 1980; Santa-Rita, 2006) e também monográfico (Alegria, 1990) e trabalhos de natureza teórica e quantitativa e assumidamente metodológica (Garrison, 1960; Nystuen e Dacey, 1961; Garrison e Marble, 1961; Karsky, 1963; Morrill, 1965; Chorley e Haggett, 1969; Gould, 1991; Pumain, 1996; Gorman e Kulkarni, 2003; Gastner e Newman, 2006; etc.);

2. Ao nível do método e da técnica - que oscila entre trabalhos baseados em métodos clássicos, de características determinísticas e técnicas pouco evoluídas do ponto de vista da capacidade de análise da informação (Taaffe *et al*, 1963); e trabalhos apoiados em modelos e teorias mais evoluídas, como os da complexidade (Wilson, 2000; Strogatz, 2001; Watts, 2004), suportados por uma tecnologia computacional robusta que lhes proporciona vantagens analíticas e de simulação.

Nos trabalhos de natureza metodológica, os estudos das redes de transporte focam-se sobretudo na análise estrutural da rede e da caracterização das suas componentes (arcos e nós) de forma individual, com recurso à topologia das métricas da Teoria dos Grafos. Haggett e Chorley, no seu livro “Network Analysis in Geography” (1969), assim como mais recentemente Potrykowski e Taylor, na publicação “Geografía del Transporte”, (1982) fazem uma muito boa síntese dos vários trabalhos realizados no domínio da Geografia das redes de transporte, como recurso à Teoria dos Grafos, a saber:

- Taaffe, Morrill, e Gould (1963), conduziram um estudo, a partir do qual propuseram um modelo de análise do processo de desenvolvimento da rede de transportes de países subdesenvolvidos. Segundo os autores concluíram, o processo de desenvolvimento decorre em quatro fases temporais e espaciais (fase inicial, fase local e de diferenciação nodal, fase de interconexão nodal e uma fase regional e de diferenciação nodal), a partir da linha de costa e em direcção ao interior.
- Garrison e Marble (1962) fazem um relato das experiências efectuadas

nas suas tentativas de conceber um modelo de simulação topológica do crescimento da rede de transportes da Irlanda do Norte de 1830 a 1930, através dos métodos do modelo Monte Carlo³;

- Morrill (1965), por sua vez, relatava uns estudos paralelos acerca da rede ferroviária da Suécia.

Todavia, estes modelos pecavam sobretudo pela abordagem demasiado simples face à maior complexidade da realidade, e falhavam na incorporação de regras menos intuitivas e mais estocásticas nos modelos, o que implicava a adopção de algoritmos matemáticos para a modelação de fenómenos geográficos (Wilson, 2000) para que possa englobar, quer as transformações das redes de transportes, quer as transformações espaciais.

Foi ao abrigo da teoria da complexidade⁴, que foram surgindo neste final do século XX e início do século XXI (consequência natural da evolução na cibernética e nas tecnologias) novos e mais evoluídos métodos e técnicas para análise de sistemas complexos, que vieram permitir a inclusão da dimensão tempo como factor endógeno dos processos transformativos (Batty, 2005), como sejam as Redes Complexas (Newman, 2003; Xu, 2007).

À medida que as redes de transportes sofrem processos transformativos sobre o território, também as suas topologias se vão alterando, assim como o território, quanto à forma como está organizado. Esta relação de causa e consequência entre as redes de transportes e o território levantam uma série de questões, que materializam o *core* desta dissertação e que passa por medir e avaliar quantitativamente e qualitativamente, a forma como a dinâmica das redes de transporte influencia a organização do território? Como se manifesta essa influência em termos de padrões espaciais? Quais os métodos

³ Método de simulação de comportamentos sistémicos mediante um conjunto de variáveis de input que denotam incerteza e aleatoriedade comportamental. Trata-se de um método de estatística matemática não linear (uma vez que combina dados de input com medidas obtidas de processos matemáticos feitos sobre elas), não determinístico (é estocástico). Foram responsáveis pelo desenvolvimento deste método, Stanislaw Ulam e John von Neumann, no decurso da segunda metade da década de 1940.

⁴ Diz-se que um sistema é complexo quando, a soma das componentes que o constituem, organizados em estruturas que podem existir em diversas escalas, não podem explicar o todo. Estes sistemas passam por processos de transformação que não são passíveis de ser descritos por uma única regra, ou seja, não podem ser reduzidos a um único nível de explanação.

utilizados para medir essa influência? Como construir e desenvolver os modelos que operacionalizem esses métodos? Que informação deve ser utilizada e que processos deve ser alvo para poder integrar os modelos? Qual a importância do factor espaço na análise de redes? Como se devem disponibilizar os resultados?

1.2. Objectivos

O que se propõe com esta dissertação e cujos resultados se analisam no capítulo 6, é medir e avaliar o impacto da rede de transportes no território, pela óptica da organização espacial, do desenvolvimento regional e da hierarquia da rede de lugares. Para atingir esta pretensão, foi necessário definir etapas com objectivos mais práticos, nomeadamente a criação de um modelo (modelo SIG-T) que englobasse os algoritmos das medidas da Teoria dos Grafos e das Redes Complexas, e as combinasse com algumas funcionalidades dos SIG, tais como as funções de vectorização, georreferenciação e a possibilidade de estabelecer uma relação entre a base de dados gráfica e a base de dados alfanumérica.

É neste enquadramento científico e técnico que se desenvolve esta dissertação, com a conceptualização, criação e aplicação de um modelo geográfico de base matemática, formulado a partir da Teoria dos Grafos e das teorias das Redes Complexas, de forma a aproveitar as potencialidades de ambos os métodos e a eliminar as suas fragilidades, a saber:

- Com a Teoria dos Grafos, o objectivo é aproveitar a capacidade descritiva das suas métricas acerca, quer da estrutura geral e interna da rede, quer da ordem que impõe aos nós que a compõem e compensar com os SIG, a sua abstracção espacial;
- Com as Redes Complexas, o objectivo é verificar se as propriedades decorrentes das teorias *Mundo pequeno* e coeficiente de *clustering* também se manifestam nas redes geográficas (como as redes rodoviárias) e que permitem caracterizar a rede acerca da sua robustez, da facilidade

de circulação (pessoas, bens, informação, ideias) que proporciona e a identificação dos nós com maior grau de intermediação.

1.3. Opções metodológicas

De uma forma mais pormenorizada, para a análise das propriedades que decorrem das redes de transportes, e dos seus nós e arcos, fez-se uso, quer das medidas de conectividade e de ligação, quer das medidas de acessibilidade e de centralidade, respectivamente, no que respeita à Teoria dos Grafos (cf. Cap. 2). Sobre as medidas de acessibilidade e de centralidade, para medir a acessibilidade individual dos nós, assim como para medir a acessibilidade geral da rede, o cálculo de matrizes foi o formalismo matemático consignado, que para além das medidas de acessibilidade e de centralidade, vai pôr em evidência também outras características e propriedades das redes, tais como: a eficácia da rede (cf. 6.4) e o potencial de interacção que exercem uns nós (lugares) sobre os outros, em função da distância que os separa e da população que comporta (cf. 6.3.).

Existem vários tipos de matrizes (matrizes de conectividade, de acessibilidade e ponderadas) para analisar a rede individualmente, do ponto de vista das suas componentes. Contudo, são as matrizes D (das distâncias topológicas mais curtas) e L (das distâncias físicas mais curtas), as que melhor adequação mostra para o estabelecimento de uma hierarquia de lugares, e para a verificação dos padrões espaciais que se formam ao longo do tempo, e à medida que ocorrem alterações na estrutura e nas relações das redes.

Todavia, entre as duas matrizes (D e L) existem diferenças que importa assinalar. Enquanto a matriz D assume que todas as ligações entre os nós têm igual valor no cálculo da medida de acessibilidade, ou seja, que os resultados apurados pela matriz D não fazem distinção, entre a diferente influência que podem ter na ordenação dos lugares e no padrão espacial desses lugares, a estrada Lisboa/Queluz e a estrada Lisboa/Porto. A matriz L, das distâncias físicas, por sua vez, já é sensível à existência, tanto de pequenas, como de grandes ligações atribuindo-lhes ponderações diferentes, o que permite medir a influência de cada ligação (estrada) na ordenação dos lugares de

acordo com a sua acessibilidade na rede. Assim, tem-se dois métodos de abordagem diferente para análise de redes e seu efeito na organização espacial: no primeiro caso trata-se de um modelo em que o espaço é considerado como isotrópico (modelo isotrópico, cf. Cap. 6.1.) e no segundo caso, do modelo contempla um espaço anisotrópico (modelo anisotrópico, cf. Cap. 6.2.).

Por fim, no que respeita ao objecto de estudo, as redes geográficas (Brunnet, 1996) das rodovias e as suas antecessoras, as estradas e os itinerários foram as estruturas viárias escolhidas para alimentar o modelo, a saber: as Estradas Romanas (datadas de 200 anos a.C.), as Estradas (itinerários de 1800) do período do pré-fontismo, as Estradas do primeiro Plano rodoviário (1945), e as Estradas do segundo (1985) e terceiro Plano Rodoviário Nacional (2000), das quais se obtiveram, por via do modelo criado (cf. Cap. 5) os resultados que se analisam (cf. Cap. 6) e através dos quais se procuram as causas que possam responder às questões que se colocaram nesta dissertação.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação estrutura-se em sete capítulos. Os capítulos 1, 2, 3 e 4 são sobretudo de teor teórico e descritivo, e dedicam-se respectivamente à apresentação da tese, à dissertação sobre o estado da arte, à análise de conceitos e respectivas definições, e à apreciação crítica acerca dos modelos e métodos testados. Os capítulos 5 e 6, de teor computacional e empírico, é onde se vai demonstrar a aderência do modelo *geo_grafo* criado à modelação com dados geográficos, e se faz a implementação do modelo e analisam-se os resultados. Por fim, no capítulo 7 apresentam-se as considerações finais em que se procura responder acerca da relevância dos resultados devolvidos pelo modelo *geo_grafo*, e se tecem algumas críticas ao modelo e apontam possíveis desenvolvimentos futuros.

De uma forma mais pormenorizada, no capítulo 1 – Introdução – trata-se de proporcionar ao leitor um enquadramento temático que explique a pertinência da dissertação, exponha as questões que se colocam e que a dissertação propõe responder. É neste capítulo que se declaram as opções metodológicas consideradas e os métodos seleccionados e criados, assim como o objecto de estudo que alimenta o modelo. Em

síntese, o capítulo da introdução funciona como um guião da dissertação, no qual se apresenta a estrutura da dissertação e o conteúdo de cada capítulo.

O capítulo 2 – Teoria dos Grafos – trata de apresentar e explicar a pertinência do formalismo das medidas de conectividade ligação e das medidas de acessibilidade e de centralidade, na análise das redes de transporte. Daqui decorreram um conjunto de questões que ajudaram a estruturar este capítulo em 5 pontos, a saber: Como surgiu a Teoria dos grafos? Por quais conceitos e definições se rege? Para que serve e que áreas científicas e domínios do conhecimento toca? Como surgiu e se desenvolveu a Teoria dos grafos no seio das ciências geográficas? Que métricas e formalismo matemático incorpora e que teorias se desenvolveram paralelamente a ela e como se podem adaptar?

É a partir desta última questão, que se estabelece a ligação para o capítulo 3 – Redes Complexas -, cujos modelos empíricos que engloba consideram-se fundamentais para uma geografia das redes, e cujas questões que se propõe responder levou à estruturação do capítulo nos seguintes pontos: Como surgiu esta nova ciência designada de Redes Complexas? Quais os principais precursores destas redes? Que modelos e que teorias incorpora? Que propriedades das redes revela e que os métodos clássicos não conseguiam identificar? E que implicação e aplicação tem em Geografia?

O capítulo 4 – sobre Os Sistemas de Informação Geográfica para Transportes (SIG-T) – marca o fim dos capítulos de teor mais teórico, e estabelece a ligação com os capítulos de conteúdo predominantemente computacional e carácter aplicativo. Todavia, o capítulo 4 não é nem uma coisa nem outra. Trata-se de um capítulo sobre a tecnologia, e sobre a importância que veio desempenhar nos estudos dos transportes e na relação dos transportes com o território. Uma vez mais, é a partir de uma série de questões que o capítulo pretende dar resposta, que se definiu a estrutura do capítulo, nomeadamente: Qual a origem e evolução dos SIG e a emergência dos SIG-T? O que se entende por SIG-T? De onde surge a relação entre os SIG, os transportes e o território? Que tipo de modelos existem? Que implicações ao nível da análise de redes rodoviárias? Quais os modelos SIG-T mais praticados e principais aplicações e tendências futuras dos SIG-T?

O capítulo 5 - Modelo para análise do efeito estruturante das redes de transportes e comunicação no território – é o capítulo da dissertação e é de teor geocomputacional. É nele em que se cria e implementa o modelo para medir o efeito estruturante das redes de transporte sobre no território, e a partir do qual se podem obter respostas objectivas, quer de índole quantitativa, quer de índole qualitativa. À parte do objectivo principal, o modelo SIG-T criado (modelo *geo_grafo*) vem permitir a representação e uma melhor compreensão da relação entre os sistemas de transporte e o território, cuja escala ou complexidade da rede poderiam, de outra forma, colocá-los fora do nosso alcance de compreensão. Trata-se de um modelo geográfico - no que respeita ao seu objecto de estudo e natureza applicativa -, de base matemática, formulado e compilado para correr num ambiente SIG, ou seja, programaram-se os algoritmos, para serem aplicados a qualquer conjunto de dados geográficos topológicos e georreferenciados, mediante a criação de uma aplicação *plugin*, hospedado num *programa SIG*.

Quanto à sua estrutura organizativa, o capítulo 5 desenvolve-se em cinco pontos: os três primeiros pontos do capítulo tratam, respectivamente, da apresentação e da introdução do modelo e referem-se a conceitos fundamentais de modelo e da modelação, sobretudo em Geografia; da conceptualização do modelo e das questões relacionadas com a informação necessária ao modelo, nomeadamente no que se refere à aquisição, à edição e estrutura de dados topológicos.

Os dois últimos pontos tratam da implementação do modelo e propõem-se a responder às seguintes questões: Como se arquitecta o modelo? Como funciona o modelo? De que forma o modelo responde às acções que ordenamos? e, como é possível aceder ao modelo e dar início ao seu processamento? Esta última questão levou à construção de um *plugin* (botão a partir do qual se pode accionar o modelo, sem ter de se aceder ao interface da linguagem de programação (LP) do *Visual Basic for Applications* (VBA), de forma a proporcionar ao utilizador menos experiente em programação, a aceder ao modelo a partir de um Interface gráfico do utilizador (IGU), mais ‘amigável’. O *plugin* “encobre” os procedimentos codificados no modelo *geo_grafo*.

O capítulo 6, de Análise dos Resultados, é onde estão expostos os valores devolvidos pelo modelo e são dadas as respostas às questões que compõem a tese

intitula esta dissertação: Qual o efeito estruturante das redes de transporte (das suas alterações no decurso do tempo) no território, ou seja, como se relacionam os lugares e distribuem no território. Em pormenor, é no capítulo 6 que:

- Se testam e validam as hipóteses colocadas ao longo das várias etapas do projecto;
- Se cria, constrói, se parametriza, e se verifica da pertinência do modelo, e dos métodos, à realidade;
- Se testa e avalia da capacidade computacional (*hardware* e *software*);
- Se cria conhecimento, com a descoberta de padrões (espaciais e métricos) revelados pelas propriedades das redes; e
- Se responde à tese proposta.

Por fim, o capítulo 7 – Considerações finais – procura responder à questão: Que relevância apresentam os resultados da dissertação? A resposta a esta questão estruturou o capítulo em dois pontos: um sobre a aderência do modelo e dos resultados à análise geográfica; e outro sobre as oportunidades que se colocam de desenvolvimento do modelo, quanto à possibilidade de difusão da sua utilização, e quanto à possibilidade de incorporação de novas funcionalidades. O último parágrafo é dedicado a uma análise auto-crítica da dissertação, sobre algumas dos critérios e decisões tomados.

2. Teoria dos Grafos

A Teoria dos Grafos é um ramo da matemática que estuda a topologia das redes, e que demonstrou ser um valioso método de análise de situações em que os fenómenos em causa estabelecem relações entre si (Tobler, 1970). Como tudo está relacionado com tudo, e nada acontece de forma isolada (Barabási, 2003:7), a Teoria dos Grafos depressa adquiriu privilégios para lá das fronteiras da matemática, passando a constituir um método fundamental nos estudos de outras ciências e.g. Física, Química, Electrotecnia, Informática, Economia, Geografia, Sociologia, Biologia, Linguística, etc., para as quais as propriedades acerca da estrutura e das componentes das redes (nós e arcos) são fundamentais à compreensão da dinâmica de sistemas, sejam eles reais ou abstractos, simples ou complexos (Kansky, 1989; Sui, 2004, Jiang, 2006).

O matemático suíço Leonhard Euler (1736), e o Problema das 7 pontes de Königsberg¹ marcam a origem da Teoria dos Grafos. Contudo, não deixa de haver algumas vozes desalinhantes, conforme se pode testemunhar a partir de Haggett e Chorley: “...the first comprehensive treatment of network topology was not published until 1936 in König’s *Theorie der endlichen und unendlichen Graphen*. The branch of topology dealing with elementary structure, which came to be called *graph theory*...” (1969:6).

¹ O documento¹ de Euler abordava um problema que intrigava a população de Königsberg (actual Kaliningrado): o chamado problema das 7 pontes de Königsberg, sobre o Rio Pregel (cf. Fig. 1).

Não obstante, a maioria dos especialistas reconhece no trabalho de Leonhard Euler² (1707-1783) a génese da Teoria dos Grafos (Figura 1).

Figura 1 – As 7 pontes sobre o Rio Pregel

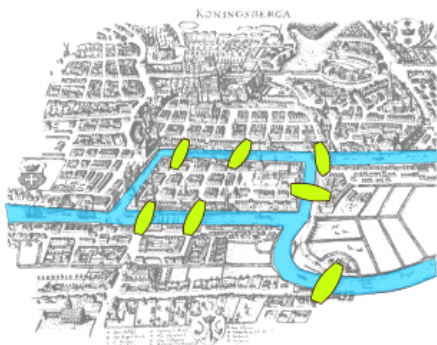
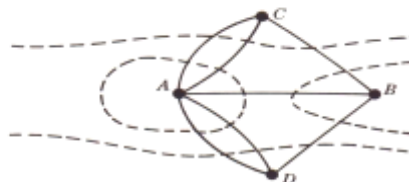


Figura 2 - Grafo euleriano



Adaptado de Gribkovskaia *et al* (2007)

O problema centrava-se na seguinte questão: seria possível percorrer toda a cidade, passando por cima das 7 pontes sem repetir nenhuma delas? Da variedade de respostas que foram surgindo, o formalismo de Euler destacou-se pela simplicidade. O modelo de Euler consistia na representação abstracta dos territórios em nós, e das pontes que os ligavam em arcos. Desta forma, Euler representou o território sob a forma de um diagrama, que veio a designar-se por grafo (Figura 2), que é consensualmente identificado como o estudo que está na génese da Teoria dos Grafos.

Com este grafo, Euler demonstrou que um caminho contínuo, que passe por todas as pontes terá, obrigatoriamente, de ter apenas um nó de partida e um nó de chegada (caminho euleriano³). Tal caminho não está representado num grafo que tenha mais do que dois nós ligados por um número ímpar de arcos, como é o caso do grafo dos 4 nós e dos 7 arcos de Königsberg. O primeiro teste à teoria do virtuosismo prático surgiu 150 anos mais tarde (1875), quando se

² Para mais informações sobre a vida e obra de Leonard Euler, ver: <http://www.educ.fc.ul.pt/docentes/opombo/seminario/euler/biografia.htm>

³ Primeiro teorema da Teoria dos grafos.

construiu uma nova ponte sobre o rio Pregel, dando-se razão a Euler e reconhecendo mérito à sua teoria.

Para além da resolução do problema, o artigo de Euler teve ainda o mérito de fazer perdurar até à actualidade dois pilares da Teoria dos Grafos: a definição mais genérica e informal de grafo e a descoberta de algumas das propriedades topológicas das redes. De um e de outro, tratar-se-á nos pontos seguintes deste capítulo, tentando clarificar algumas questões-chave acerca da Teoria dos Grafos, nomeadamente: que conceitos e definições a Teoria dos Grafos incorpora? Para que serve e que áreas científicas e domínios do conhecimento toca? Que métricas e que formalismo matemático incorpora? Que teorias se desenvolveram paralelamente à Teoria dos Grafos e como se podem adaptar? Que propriedades encerram as redes e que os grafos permitem mostrar? e como surgiu e se desenvolveu a Teoria dos Grafos no seio das ciências geográficas.

2.1. Conceitos e definições

A pertinência de um sub-capítulo sobre conceitos e definições numa dissertação de cariz metodológico mede-se pela necessidade em clarificar um conjunto de termos que, quer devido à difusa literatura sobre a temática em vários domínios científicos e técnicos - de que resulta falta de consenso no uso dos termos -, quer ao rigor que se quer imprimir, permitem garantir coerência e evitar ambiguidades. Não se pretende fazer aqui uma análise exaustiva sobre toda a terminologia da Teoria dos Grafos; pelo contrário, esta será uma abordagem orientada apenas para os conceitos que se consideram fundamentais para a compreensão da Teoria dos Grafos e para a importância que têm neste estudo. Também vamos explicitar os termos que são aqui usados e que são considerados indispensáveis para o correcto entendimento desta dissertação.

Vários autores têm advertido para a existência de uma certa incoerência no uso dos termos, assim como uma certa leviandade na terminologia utilizada. Haggett e Chorley sublinham que “One of the complications in applying graph theory to the analysis of network structure is the very confused and overlapping terminology. Lines are commonly referred to as ‘links’, ‘edges’, ‘sides’, ‘arcs’, ‘segments’, ‘branches’, ‘routes’ or ‘one-cells’; while points are

described as ‘nodes’, ‘vertices’, ‘junctions’, ‘intersections’, ‘terminals’ or ‘zero-cells’ (...) Terms are often restricted to a particular applied field (e.g., in the medical literature links and nodes become ‘neurons’ and ‘synapses’) ...” (Haggett e Chorley, 1969:6); Wilson, por seu lado, dedica mesmo um sub-capítulo a estas questões (“Remark on terminology”), na sua obra “Introduction to graph theory”, onde explicita que: “The language of graph theory is decidedly non-standard – every author has his own terminology.” (1972:10), ou ainda no caso de Thomas, que admite, que ao longo da sua obra, os termos “graph and network, vertice and node, as well edge and link will here be used interchangeably.” (Wilson, 2002:293).

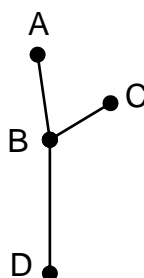
Também Taaffe e Gauthier referem em nota de rodapé a fácil confusão que é feita no uso de termos, alertando o leitor para o facto de que “Technically the terms vertices and nodes are used to refer to abstract networks, whereas the terms node and linkage refer to a real-world network before it is abstracted. This distinction is difficult to follow in practice. Vertices and nodes, and edges and links, will be used interchangeably...” (Taaffe e Gauthier, 1973:101). Mais críticos no que se diz respeito à análise de redes em geografia, são Dalton, Garlick, Minshull e Robinson⁴ que advertem para o facto de os investigadores se contradizem e introduzirem grandes ambiguidades quando utilizam diferentes termos para as mesmas técnicas. “The extreme case is that of the technique referred to as the route shape index (...), which is called the degree of circuit by Kansky, the detour index by Cole & King, the index of directness by Tidswell & Baker in one place, and the index of accessibility by them a few pages later...” (Dalton *et al*, 1973:4).

Para esta problemática contribui também o facto da Teoria dos Grafos, desde Euler até à actualidade, ter deixado de ser estudada e aplicada exclusivamente na Matemática, para ser adoptada por outros domínios científicos, nomeadamente, nas ciências sociais e humanas. Com efeito, verifica-se uma proporcionalidade entre a dispersão do tema por mais e diversos domínios científicos, e o aumento de ‘ruído’ em torno do tema, de que resulta muitas das vezes numa visão enviesada e deturpada do original (Watts, 2003:28).

⁴ Dalton, R.; Garlick, J.; Minshull, R.; Robinson, A. (1973) – Networks in Geography. Modern Techniques in Geography. London. Philip, pp. 60

No entanto, aceita-se que entre as várias definições provenientes de vários domínios científicos e técnicos, com maior ou menor formalismo matemático, existe um denominador comum no que concerne o entendimento que se tem de grafo (G): dois pares de conjuntos. Um conjunto finito e não-vazio composto por nós $N(G)$ ligados entre si por um conjunto pré-definido de arcos $A(G)$. Formalmente descrito como $G = (N, A)$.

Figura 3 – Grafo (G), dos nós $N=\{A, B, C, D\}$, ligados pelos arcos $A=\{\{A,B\}, \{B,C\}, \{B,D\}\}$



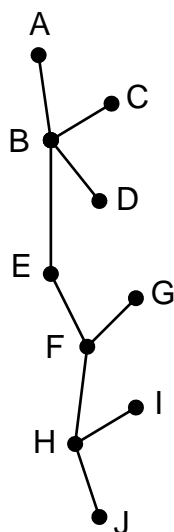
De um ponto de vista gráfico, um grafo é um diagrama representado por um conjunto de pontos (que de agora em diante serão chamados de nós) ligados por segmentos (de agora em diante chamados de arcos); uma representação abstracta de uma rede, em que os conceitos de localização, distância, comprimento, orientação e forma são substituídas por propriedades topológicas⁵ (cf. 2.3), tais como: acessibilidade, centralidade, adjacência, conectividade e ligação, e, a partir das quais, mediante algoritmos e o cálculo de matrizes é possível estudar as suas componentes (nós e arcos) e hierarquizá-las, ou estudar a rede no seu todo, respectivamente. Embora, quando se olha para um grafo, haja uma primeira preocupação para se entender a disposição dos nós e dos arcos que os ligam, a verdade é que nada disso é realmente importante na Teoria dos Grafos. O que realmente importa são as ligações ou conexões entre os nós. É a topologia que sobreleva, não a geografia.

⁵ “What is the diameter of the world wide Web? The answer is not 7,927 miles even though the Web is truly world wide. (...)The diameter in question is not a geometric distance. The concept comes from the branch of the mathematics called graph theory; On the Web, you get from place to place by clicking on hypertext links, and so it makes sense to define distance by counting your steps through such links” (Hayes, 2000:9).

Quanto à sua topologia, um grafo pode ser classificado segundo diferentes conceitos, e.g. simples, gerais, nulo, desconexo, completo, em árvore, floresta, regular, irregular, platónico, bipartido, infinito, isomórfico, orientado, não-orientado, ... (Haggett e Chorley, 1967; Wilson, 1972; Taaffe e Gauthier, 1973; Dalton *et al*, 1973; Potrykowski e Taylor, 1984; Tucker, 2001; Black, 2003). As classificações são inúmeras e por vezes com definições pouco claras.

Dependendo da aplicação, os grafos podem ser direccionados ou orientados, e nesse caso os arcos são representadas por "setas". Se forem não-direccionados ou não-orientados (cf. Figura 4) os arcos são representados apenas por segmentos, sem qualquer indicação de sentido, o que pressupõe a possibilidade de existência de fluxos em ambos os sentidos.

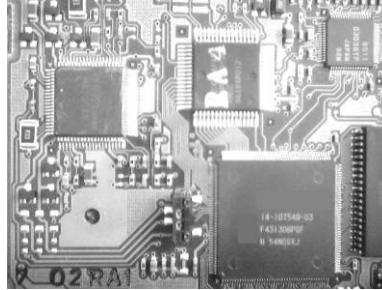
Figura 4 – Grafo não-orientado



Os grafos podem ainda ser classificados como sendo grafos planares ou grafos não-planares. Dizem-se planares, os grafos cujos arcos que se cruzaram formam necessariamente um nó, i.e., não pode haver cruzamento de arcos sem que um nó seja constituído na rede. Quando é permitido o cruzamento de arcos sem que se constitua um nó na rede, diz-se que se está na presença de um grafo não-planar. É exemplo de um grafo planar, a rede de rodovias que ligam as

idades de uma dada região ou país, assim como, para não nos restringirmos apenas a exemplos de fenómenos espaciais, a rede microelétrica de um circuito integrado - chip (Figura 5).

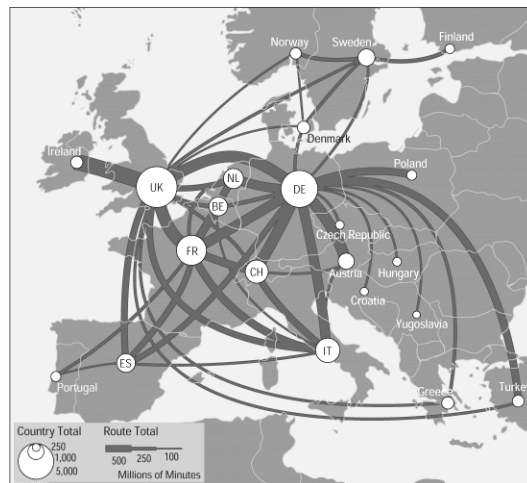
Figura 5 – Grafo planar (CHIP)



Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:HD%27sMainBoard.JPG#file>.

Como exemplo de um grafo não-planar podemos referir a rede de tráfego aéreo de uma qualquer companhia de aviação ou a rede de tráfego na internet (Figura 6)

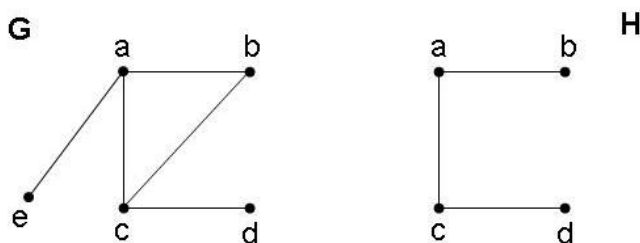
Figura 6 – Grafo não-planar, com o fluxo de tráfego europeu na internet, 1997



TeleGeography, Inc.,

Por sub-grafo de um qualquer grafo entende-se um sub-conjunto de nós e arcos do grafo, ou seja, graficamente, tem-se dois grafos. Mas como esses dois grafos são parte da mesma rede, então está-se na presença de um sub-grafo do grafo principal. Formalmente define-se que um grafo H é um sub-grafo de um grafo G se, $N_H \subseteq N_G$ e $A_H \subseteq A_G$, sendo N os nós e A os arcos do grafo, respectivamente (Figura 7).

Figura 7 – Sub-grafo H , do grafo G .



Um claro exemplo deste caso é a rede de estradas de Portugal. No seu conjunto é um grafo, composto no entanto por vários sub-grafos. O sub-grafo da rede de estradas de Portugal continental e os sub-grafos da rede de estradas das várias ilhas que compõem os arquipélagos da Madeira e dos Açores, que por força da insularidade, e apesar de pertencerem à mesma rede de estradas, não têm uma ligação entre elas. No entanto, qualquer grafo é simultaneamente também um sub-grafo de si próprio. Este conceito é particularmente importante, por constituir variável de algumas das medidas topológicas, com o propósito de medir e classificar a estrutura da rede (tabela 2, em Anexo).

Um grafo diz-se regular, no caso de todos os nós do grafo terem o mesmo número de arcos a confluir para si (grau de acessibilidade do nó). Este conceito e esta medida são de extrema utilidade, por exemplo numa análise ao grau de vulnerabilidade da rede (cf. Cap. 6). Saber identificar qual o arco e o(s) nó(s) que no caso de ‘falha’ ou ‘desaparecimento’, têm como consequência a quebra do grafo e interrupção de quaisquer tipos de fluxos. No caso de não existir

o mesmo grau de acessibilidade para todos os nós do grafo, diz-se então que o grafo é irregular.

Outros conceitos que importa explicitar no âmbito do tipo de análise desenvolvida para esta dissertação são:

- Distância topológica – distância medida entre dois ou mais nós, através do número de arcos que os separam.
- Conectividade – significa a existência ou não de ligação entre quaisquer locais. Na geografia dos transportes é um indicador fundamental da estruturação e valorização do espaço.
- Acessibilidade – consiste na possibilidade de se poder aceder a um local, ou conjunto de locais. Está fortemente dependente da conectividade, sendo que a acessibilidade é função da cobertura do território por infra-estruturas de transporte, e é tanto maior quanto maior a permeabilidade do território à rede de infra-estruturas. É, tal como a conectividade, um indicador forte da estruturação do espaço, na ponderação acerca da localização das actividades e também ou, consequentemente, na valorização do espaço.
- Ordem (de um grafo) – número total de nós.
- Dimensão (de um grafo) – número total de arcos.
- Caminho – percurso linear no qual nenhum nó aparece mais do que uma vez.
- Circuito – é um caminho fechado que se inicia e termina no mesmo nó, sem que se passe duas vezes pelo mesmo arco.
- Região – área intersticial ou envolvente ao grafo.
- Cadeia – é uma sucessão de arcos tal que cada um (excepto o primeiro e o último) tem um nó comum com o arco precedente e um outro em comum com o arco seguinte; é um caminho entre dois nós.
- Comprimento da cadeia – é o número de arcos que a cadeia tem.

- Cadeia aberta – é aquela que termina e acaba em nós diferentes.
- Rede incoerente ou em árvore - rede em que não existem circuitos.
- Rede complexa – rede com vários circuitos.
- Grafo conectado – significa grafo uno ou grafo de ‘peça única’, i.e., grafo em que qualquer par de nós tem um arco a ligá-los.
- Multigrafo – é um grafo em que existem vários arcos a ligarem quaisquer pares de nós.
- Circuito euleriano – é um circuito que permite visitar todos os nós pelo menos uma vez e que passa por todos os arcos apenas uma vez.
- Caminho euleriano – é um percurso que contém todos os arcos e vai a todos os nós.
- Circuito hamiltoniano – ou, neste caso, caminho hamiltoniano significa que se passa por cada nó pelo menos uma vez.
- Árvore – é um tipo de grafo, em que existe um nó que é designado de raiz e a partir do qual só existe um único caminho para se ir a qualquer outro nó do grafo. Se a árvore for um grafo não-direccionado, significa que qualquer um dos nós do grafo pode ser o nó chamado de raiz.
- Floresta – é um tipo de grafo em que os nós estão isolados, pelo que não existe qualquer circuito. Um grafo conectado (floresta de nós ligados) é chamado de árvore.
- Adjacência – Diz-se que um nó x é adjacente de um nó y , se o par (x,y) for um arco, ou seja, se existir um arco directo a ligá-los. No caso de grafos direccionados, a adjacência não é uma propriedade simétrica. Normalmente, a adjacência é representada sob a forma de matriz (matriz de adjacências; cf. 2.4).

No geral, para a maioria dos grafos em ciências geográficas, as entidades representadas de maneira abstracta sob forma de um conjunto de nós são cidades, vilas, casas, árvores, junções de

vias, etc. Quanto ao conjunto de arcos da rede, que representam as ligações ou relações entre os nós, classicamente são representações das entidades como as rodovias, as ferrovias e as telecomunicações. Em particular, e no que reporta ao estudo desta dissertação, considera-se um grafo, as redes de transportes rodoviárias, em que no lugar dos arcos estão as rodovias a assumir o lugar de nós do grafo, as cidades e junções das vias, subscrevendo assim a definição feita por Kansky, de grafo: “...in geographers’ terms as ‘a set of geographic locations interconnected in a system by a number of routes’”. (Kansky, 1969:5)

2.2. A Teoria dos Grafos nas ciências geográficas

A razão do uso de métodos e técnicas analíticas nas ciências geográficas reside na necessidade de se definirem e determinarem medidas para determinado tipo de fenómenos espaciais. Essas medidas, quando aplicadas ao estudo das redes, servem para duas coisas:

- Descrever quantitativamente a rede; e
- Comparar exactamente uma rede com outra (Dalton *et al*, 1973:3).

Nesta dissertação, e no contexto científico actual, considera-se mais um ponto, em que a importância das medidas provenientes da Teoria dos Grafos é fundamental: a exploração dos fenómenos na procura de propriedades emergentes das redes, e.g., mundo pequeno, coeficiente de *cluster's* e os *hub's* (Strogatz, 2001; Albert e Barabási, 2002; Sui, 2004; Jiang, 2006; Xu e Sui, 2007).

Desde a sua fundação, nos domínios da matemática, que novos teoremas e algoritmos têm reformulado a Teoria dos Grafos relevando-lhe uma vocação aplicativa na resolução de problemas e consequentemente, na descoberta de conhecimento noutros domínios científicos, com maior ou menor afinidade do ponto de vista formal, tais como: a Física, a Química, a Biologia, a Medicina, a Electrónica e as Telecomunicações em geral, enquanto nas ciências sociais se destaca, a Sociologia, a Psicologia, a Antropologia, a Economia, e a Geografia (Strogatz, 2001).

Enquanto ramo da Matemática, a Teoria dos Grafos simplifica a realidade sob a forma gráfica de nós e arcos; uma abstracção dos fenómenos reais que contudo não retira, antes pelo contrário, ao método especial a vocação para análises empíricas e analíticas e, conseqüentemente, para a resolução de problemas reais.

No caso da Geografia, é o sub-domínio da Geografia dos Transportes, o ramo que mais tem invocado a Teoria dos Grafos, sendo que a análise de redes de transporte e comunicação só começa a ter relevância maior na década de 60, conforme se pode aferir de Haggett e Chorley: “Since transport systems with intricate pattern of road, rail, pipeline, air and telecommunications forms a major class of geographically-relevant circuit systems, they are used to illustrate the structural problems posed by this class of graphs. Substantive geographical accounts of these transport systems are given in a number of texts (e.g. Clozier, 1963; Wilson, 1967; Taaffe and Gauthier, 1969; Ullman, in James and Jones, 1954; see also the extensive literature reviews by Leinbac, 1967; Siddall, 1964; Wolfe, 1961)”. (Haggett e Chorley, 1969:31), e a que se podem ainda adicionar os trabalhos Shimbel⁶, 1953; de Garrison,⁷ 1960 e de Garrison e Marble⁸, 1961; Nystuen, J. e Dacey, M., 1961⁹; Kansky¹⁰, 1963 e de Taaffe, Morrill e Gould, 1963.

Se é verdade que a análise espacial das redes de transporte e comunicação sempre constituiu matéria de interesse para a Geografia, independentemente das transformações ocorridas, quer nos meios de transporte, quer no território, - e que os geógrafos foram dos primeiros cientistas a perceberem este fenómeno de interacção espacial (Haggett, 2001), a estudá-lo e medir as suas implicações na organização espacial (Taaffe e Gauthier, 1973) - é também verdade que o uso da Teoria dos Grafos, para o estudo das redes deixou de ser recorrente em Geografia após a década de 60 da Geografia Teórica e Quantitativa.

⁶ Shimbel, A., 1953 – Structural Parameters of Communication Networks. Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol. 15.

⁷ Garrison, W., 1960 – Connectivity of the interstate highway system. Papers of the Regional Science Association, 6.

⁸ Garrison, W.; Marble, D., 1961 – The Structure of Transportation Networks. Washington, D.C. Department of Commerce, Office of Technical Services.

⁹ Nystuen, J.; Dacey, M., 1961 – A Graph Theory Interpretation of Nodal Regions. Papers and Proceedings of the Regional Science Association, 7:29-42.

¹⁰ Kansky, K., 1963 – Structure of Transportation Networks. University of Chicago. Department of Geography Research Paper Nº 84.

Da análise bibliográfica feita para esta dissertação, apesar de cedo se ter revelado como padrão a existência de uma consciência colectiva acerca da influência exercida pela rede de transportes e comunicação sobre o território (Batty, 2001; Mun, 1997; Gaspar, 1986), a maioria dos estudos resultava em trabalhos de teor descritivo, focados numa perspectiva mais histórica e institucional e muitos poucos recorriam aos métodos quantitativos e à análise espacial. Desta forma, os modelos desenvolvidos constituem fracos auxiliares à formulação de teorias (Taaffe; Gauthier e O’Kelly, 1996).

Dos modelos explicativos da localização e distribuição espacial com base nas teorias micro-económicas, aos modelos de interacção espacial (cf. Tabela 1), existem dois séculos de preocupações pelo território e pelas relações que nele se estabelecem. Mas foi sobretudo no decurso das décadas de 60 e 70 com a introdução da matemática na análise sistémica do território (Wilson, 2000), que a Teoria dos Grafos surge nas ciências geográficas (Potrikowski e Taylor, 1984; Xu, 2007), e adquire maior importância no estudo da estrutura espacial das redes. “...that the description and analysis of network structure has been a traditional concern of geographers. Among the methods employed in the description of networks have been the preparation of maps and tables listing distances, capacities, flows (...) During the past several years a more consistent set of summarizing measures of network characteristics has been developed in order to provide a better basis for the comparison and evaluation of Networks. The efforts have drawn heavily on the concepts of graph theory to describe the topological structure of networks” (Taaffe e Gauthier, 1973:100).

Tabela 1 - Síntese dos Modelos de Interação espacial em Geografia

| AUTOR | DATA | OBRA / TIPO MODELO / ASSUNTO DOMINANTE | SÍNDISSERTAÇÃO DO ASSUNTO DOMINANTE |
|---|-------------|--|---|
| Richard Cantillon | 1755 | <i>Essai / Microeconómicos</i> | Organização social e espacial com base nos determinantes tempo e transportes, de que resultou a hierarquia aldeia/burgo/cidade, numa lógica de economias de aglomeração e de escala. |
| Von Thünen | 1826 | Utilização do solo agrícola / Microeconómico | Refere a importância dos factores distância e custos de transporte (do povoado agrícola a um mercado) na determinação da regularidade espacial. Daqui resultou o estabelecimento de padrões de utilização do solo. Admite condições de concorrência de usos e avança teorias da melhor utilização agrícola por locais. |
| Alfred Weber | 1909 | Teoria da Localização das Indústrias / Microeconómico | Reconhece ser a indústria o fundamento de novas aglomerações populacionais. Modela a localização industrial, com base em factores económicos, e.g. custos de transporte, custos de mão-de-obra e a economia de aglomeração. |
| Christaller | 1933 | Teoria dos Lugares Centrais / Microeconómico | Expõe a forma de organização espacial das povoações, e das áreas de influência destas, com base nas relações funcionais entre elas proporcionadas pela mobilidade e acessibilidade. O seu modelo tem uma configuração geométrica hexagonal. |
| Abordagem Ecológica: Burgess, MacKenzie e Hoyt | 1920 - 1940 | Modelo das zonas concêntricas da estrutura espacial e social / Microeconómico | Saído da Escola de Chicago, este movimento manifestou-se na introdução de termos ecológicos na análise da estrutura espacial, dando o destaque dado aos factores de acessibilidade e mobilidade, determinados pelos principais eixos de transporte, para propor um modelo espacial de organização por sectores, cujos padrões sociais, económicos (rendas). |
| Wingo e Alonso | 1961 - 1964 | <i>Modelo de Mercado fundiário em função do custo dos transportes / Microeconómico</i> | A localização das populações e dos serviços são determinados em função do custo do solo, que por sua vez é determinado pelo custo do transporte, entre outros factores. |
| Este período é marcado pela transição entre os modelos de localização de matriz predominantemente microeconómica, e os modelos de interação espacial. Na base desta mudança estão as críticas aos primeiros, que apontavam para o facto de se centrarem demasiado em torno dos indivíduos (agentes em competição pelo espaço) e menos nas relações estabelecidas, não só entre os indivíduos, mas também com o território e as infra-estruturas, como forma de procurar padrões homogêneos. Como resposta, inicia-se na década de 60, com o impulso do quantitativo nas ciências, novas teorias e novos modelos: modelos de interação espacial. | | | |
| Harvey | Anos 70 | <i>Social Justice in the City</i> | Corrente da Economia Política, que procura explicação para os problemas sociais, económicos (vulgarizados na maioria das cidades), e urbanos, com base nas ideologias políticas resultantes de influências da propriedade particular, das empresas privadas, e da procura de lucro. |
| Wilson e Batty | 1970 e 1976 | Sistema de Cidades como um todo | A introdução da matematização e quantificação na análise sistémica da cidade. Estudo dos fenómenos de interação entre cidades, de que resultou a modelação urbana e regional, como forma de previsão de probabilidades/cenários possíveis. A técnica da Ecologia Factorial, recuperada da Escola de Chicago, proporcionou um desenvolvimento nos estudos do complexo fenómeno urbano. Este avanço metodológico ocorreu em paralelo com os estudos morfológicos intra-urbanos. |
| Diversos | Anos 80 ... | A cidade como sistema e como centro de radiação e de competitividade internacional | A cidade como sistema fragmentado, tanto do ponto de vista espacial como do ponto de vista social. A 'redução' da cidade a objecto de marketing para captar investimento nas actividades, nomeadamente nas actividades emergentes (indústrias culturais, por exemplo). A cidade na rede de cidades - do espaço contínuo ao espaço rede? - na era da globalização económica, social e cultural. |

A análise espacial das redes de transportes constituiu desde sempre um objecto de estudo da Geografia (Hensher, *et al*, 2004:1), muito embora nos seus primórdios esses estudos se tenham detido estritamente no âmbito da concepção e descrição de mapas, na elaboração das tabelas de distâncias e nos cálculos dos diferentes índices de densidade da rede e das isócronas. Só no início da década de 60, do século XX, Garrison (1960), num estudo sobre a estrutura espacial das redes de estradas inter-estados, fez uso dos métodos baseados nas propriedades topológicas dos grafos.

Claro que outras metodologias independentes da base matemática da Teoria dos grafos foram contempladas. Taffee, Morril e Gould, num estudo sobre redes de estradas em países africanos fizeram notar a importância de um olhar geográfico para a formulação de modelos de desenvolvimento de redes de comunicação. Baseados em dados empíricos, os autores desenharam um padrão que acharam aplicável para todas as estradas: “The results of the regression analysis indicate a close relationship between the internal distribution of road mileage and total population (...) Briefly, it has been found that in a given unit, road mileage is in general proportional to the square root (approximately) of the population times the square root (approximately) of the area.” (Taaffe *et al*, 1973: 46)¹¹.

Segundo os autores, o modelo de desenvolvimento da rede de estradas de países de fraco desenvolvimento económico decorre em quatro fases (Figura 8):

Fase 1 – Considere-se um litoral marítimo com pequenos portos e povoados comerciais, com fracas áreas de influência e débeis ligações entre eles. A comunicação estabelece-se através de pequenas embarcações de pesca e mercantis.

Fase 2 – Surgem as primeiras linhas de comunicação que vão estabelecer contacto com pontos do interior do país desde o litoral (B). Simultaneamente, os portos P1 e P2 desenvolvem-se e vêem crescer as suas áreas de influência (C). Segundo os autores, esta é a fase mais importante no processo de desenvolvimento dos países de fraco desenvolvimento económico. Aqui podem destacar-se três causas fundamentais que condicionam o aparecimento das primeiras linhas de comunicação do litoral para o interior: 1) a tendência para exercer o controlo político e

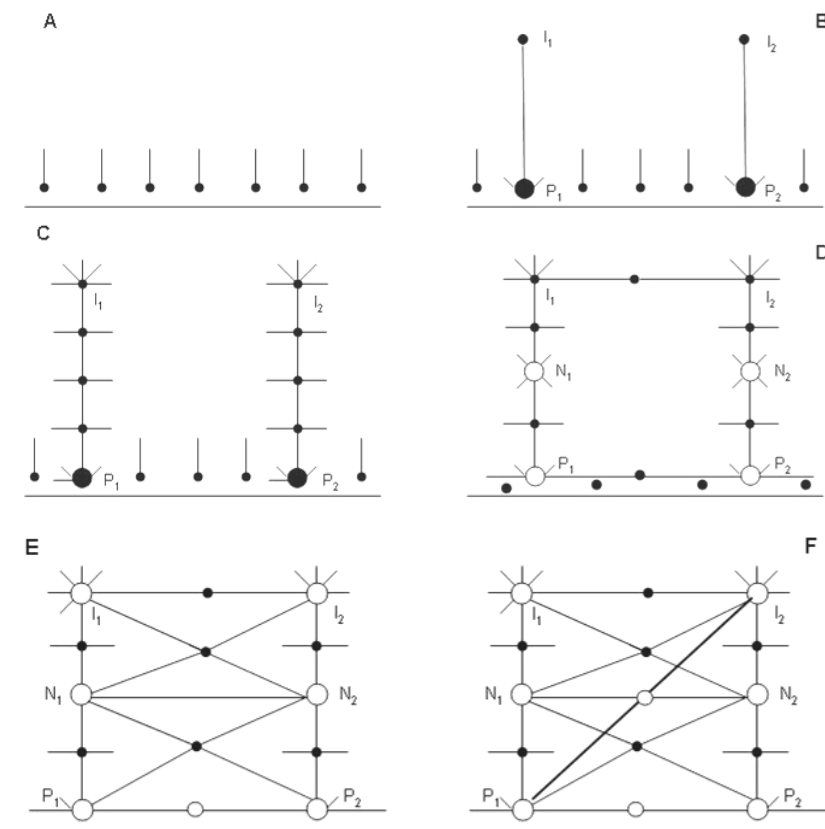
¹¹ Formalmente: $\sum kmroad = \sqrt{p} * \sqrt{s}$, p (population) and s (surface).

militar da área; 2) a tendência para explorar e exportar riquezas naturais; 3) a tendência para exportar os produtos agrícolas.

Fase 3 – Ao longo das linhas de comunicação vão germinando e desenvolvendo-se outros aglomerados populacionais. Surgem tanto junto às linhas laterais, como junto aos portos maiores e às cidades do interior (C e D). A concentração da actividade económica nos portos maiores vai acelerar ainda mais o seu desenvolvimento em detrimento dos portos mais pequenos, que inclusivamente podem definhir. Simultaneamente, assiste-se ao aumento das periferias das grandes cidades à custa da asfixia das cidades mais pequenas.

Fase 4 – Algumas linhas de comunicação laterais começam a juntar-se e conduzem ao surgimento de novos nós (D e E). Assiste-se à tendência para a especialização e ao crescimento de mercados urbanos, o que justifica o aparecimento da competitividade. Por fim, verifica-se a existência de ligações privilegiadas entre as cidades maiores, o que permite maiores fluxos (F). Esta fase é caracterizada pelo domínio da rede de estradas sobre a da rede ferroviária.

Figura 8 – Fases de desenvolvimento da rede de transportes em Países de fraco desenvolvimento económico.



Fonte: Taaffe, Morril e Gould, 1963.

No entanto, os resultados teimavam em não explicar cabalmente todas as particularidades de que se revestem as redes e as transformações que provocam no território, sobretudo porque negligenciavam o carácter dinâmico das redes, ou seja, os nós não são sempre os mesmos e só as ligações (arcos) é que vão sendo adicionadas, pelo que foram surgindo outros modelos, nomeadamente, o modelo de R. Lachene, 1965.

O modelo de Lachene baseava-se num conjunto de pressupostos hipotéticos: a área de estudo era o interior de qualquer País; existia uma actividade económica homogénea; e a população ocupava o território de modo disperso. Para que existisse uma medida comparável

justa, Lachene apontou igualmente 4 fases de desenvolvimento do território para explicar o seu modelo:

Fase I – Sobre uma área uniformemente desenvolvida existe uma rede de estradas de nível inferior e com uma configuração em árvore;

Fase II – É no cruzamento das estradas que surgem as cidades;

Fase III – Com o desenvolvimento das cidades e o progresso técnico dos transportes surgem as condições para que se forme um novo tipo de rede, e.g., rede ferroviária, que ainda que não una alguns dos nós existentes, vai ter uma capacidade superior à rede de estradas;

Fase IV – A formação de uma rede diferenciada decorrente da fase anterior vem proporcionar um aumento de potencial de todos os aglomerados populacionais e provocar um aceleração ao processo de desenvolvimento, sobretudo para as três cidades maiores.

Não obstante os modelos desenvolvidos, a situação continuava a marcar-se pela não explicação universal, devidamente fundamentada cientificamente com métricas, da relação existente entre as redes de transportes e a organização e desenvolvimento do território.

Para responder a esta premissa surgem os modelos com base na simulação, o que marcou a introdução do formalismo matemático na análise espacial e a passagem de uma fase de diagnóstico, para cenários de prognóstico nas ciências geográficas e, muito particularmente, nos estudos sobre as redes de transporte e o território. “La simulación no ha encontrado hasta ahora muchas aplicaciones en los estudios de la geografía y del transporte.” (Potrykowski e Taylor, 1984:105).

É com esta fase da quantificação na análise espacial em Geografia, que vão surgir os primeiros estudos de redes através de métodos baseados na Teoria dos Grafos. Os modelos de Shimbel (1953) e de Kansky (1963) são os primeiros exemplos formais. O primeiro diz respeito a

um estudo de teor teórico que contemplava a determinação de parâmetros estruturais para análise de redes de comunicação¹², e introduziu o método do cálculo da matriz D ou matriz de Shimbel para análise interna da rede (cf. 2.3.2.). O segundo é um modelo que estimava o desenvolvimento da rede de transportes através de um processo aditivo de ligações. O modelo representava a rede de transportes segundo um diagrama de arcos (rede de estradas) e nós (cidades), através do qual o autor conseguia determinar previamente a distância média e o número de arcos que a rede iria ter, mediante análise relacional entre a estrutura da rede, o nível socioeconómico da região, a dimensão da área de estudo e a sua dinâmica morfológica e forma.

O modelo foi inicialmente elaborado para o território da Sicília (Itália) e tinha por objecto a rede ferroviária, isto porque, segundo Kansky, a ferrovia reflectia bem as características regionais da Ilha, já que era possível estabelecer uma relação directa entre a ordem em que foram sendo construídas as linhas e o desenvolvimento económico da região. “Un mayor grado de concentración representa una mayor probabilidad de la construction de las líneas.” (Protykowski e Taylor, 1984:108).

Efectivamente, no seu estudo, Kansky demonstrou que é possível determinar a probabilidade de localização de um novo núcleo populacional, após se estudar a estrutura da rede e o nível de desenvolvimento económico das cidades maiores, mediante os seguintes procedimentos metodológicos:

- Dispõe o sistema de rede segundo a forma de um grafo, em que os nós são as cidades e os arcos as linhas ferroviárias que as unem;
- Vai adicionando gradualmente, a cada um dos nós da rede (cidade) um arco de forma que a cidade seguinte, de acordo com a sua dimensão vai ligar-se com a maior e mais próxima cidade da rede;
- Quando todos os nós estiverem ligados, continua o procedimento para obter consecutivas ligações com a primeira, segunda, terceira, ... n cidades da rede;

¹² Cf. Alfonso Shimbel, 1953. Structural Parameters of Communication Networks. Bulletin of Mathematical Biophysics, Volume 15. pp 501-507.

- Este procedimento vai provocar algumas alterações nas ligações iniciais, nomeadamente, ao suprimento de algumas ligações e a um contínuo ajuste face ao relevo;
- Faz-se a comparação entre a rede obtida pela simulação e a rede existente, verificando-se determinadas diferenças locais face ao factor relevo, e anota-se a semelhança da geometria.

Após Kansky¹³, outros estudos foram surgindo, embora muitos deles com base nos mesmos pressupostos e por conseguinte pouco contribuíram para um avanço teórico, tendo-se criado um hiato teórico e quantitativo de uso da Teoria dos Grafos nas Ciências sociais em geral, e na Geografia em particular. Segundo Barnes e Harary (1983), a teoria dos grafos tem sido pouco e muito mal aproveitada pelas ciências sociais, geografia inclusive. Na maioria dos casos, os analistas recorrem a ela apenas para uso da terminologia ou dos conceitos, negligenciando os teoremas e algoritmos cuja aplicabilidade em redes reais está explícita.

Após este hiato de cerca de 30 anos, a Teoria dos Grafos só voltou a constituir método de análise da estrutura das redes, com a entrada no século XXI, altura em que a modelação e a análise quantitativa de dados (Batty, 2003; Pumain, 2003; Chapman, 2006) voltou a assumir destaque. Aludindo ao percurso irregular da Teoria dos Grafos nas ciências geográficas, a que Haggett e Chorley apelidaram de algo fragmentado, os mesmos previam que “any general theory of network growth lies in future research” (1969: 261). Ainda a sublinhar e justificar este menor uso das métricas desenvolvidas no âmbito da Teoria dos Grafos, está o facto de as redes serem sistemas complexos, tal como era complexo e complicado a análise das suas propriedades sem o auxílio da computação (cf. Cap. 5).

O facto é que o recente e renovado interesse dos geógrafos e da Geografia pela Teoria dos Grafos deveu-se ao desenvolvimento dos SIG (Gastner e Newman, 2006). Sobretudo se analisarmos o fenómeno no domínio das ciências geográficas, na medida em que estes vieram

¹³ Garrison (1960) recorreu da Teoria dos grafos para medir a conectividade do sistema interestadual de auto-estradas do SW americano; Kansky (1963) voltou a dedicar a sua atenção à análise de redes e propôs 14 índices para medir e explorar a topologia duma rede de transportes e mais recentemente, Dill (2004) inovou no objecto de estudo (redes de ciclovias e redes pedonais) mas manteve os mesmos índices para medir a conectividade das redes, na região de Oregon.

contornar um dos problemas apontados à Teoria dos Grafos, mais precisamente a sua abstracção espacial e a sua incapacidade de incorporar os atributos de localização (coordenadas), o que segundo aqueles que se dedicavam a estudar os fenómenos espaciais, constituía uma falha grave, visto excluir uma variável fundamental na explicação dos processos inter-activos e intra-activos entre os biótopos naturais e os biótopos artificiais de que resulta a configuração de padrões espaciais e a paisagem: o território.

Efectivamente, com o advento quer dos SIG (que permite a espacialização de dados, que até então ficavam apenas no domínio da matemática e da estatística), quer da maior capacidade computacional das máquinas e dos programas desenvolvidos, a Teoria dos grafos voltou a constituir método privilegiado para análise espacial (Batty, 2001; Batty, 2003:3).

A crescente tendência da Teoria dos Grafos e dos seus métodos matemáticos, na resolução de problemas reais, teve por génese dois factores: a globalização, que conferiu às redes a propriedade da ubiquidade em todos os aspectos da sociedade, tal como sempre existiram na natureza; o rápido desenvolvimento tecnológico verificado sobretudo na década de 90, sobretudo da micro-tecnologia e da computação, que permitiu a adopção dos métodos clássicos da teoria do Grafos, e outros que entretanto se desenvolveram, ao estudo de redes em fenómenos de grande dimensão e complexidade, de que são exemplo a *www*¹⁴ de Martin Dodge, a Internet¹⁵ de Mathew Zook e de Albert-László Barabási, bem como as ligações aéreas.

Qual então a razão para tamanha discrepância de interesse e de material publicado acerca da Teoria dos Grafos? A resposta não é certamente simples, nem cabe aqui encontrá-la. No

¹⁴ *World Wide Web* – é uma aplicação, baseado num programa que permite tirar e introduzir informação de e em qualquer computador ligado através da internet. O seu autor foi Berners-Lee, um programador inglês, em 1990 altura a partir da qual se tornou possível à internet uma amplitude mundial. (Castells, 2001:26-32). Para ver a cybergeography de Martin Dodge, consultar <http://www.cybergeography.org>, e a InternetGeography de Mathew Zook, ver: <http://www.zooknic.com>.

¹⁵ A internet tem as suas origens na ARPANET, uma rede de computadores criada pela ARPA (Advanced Research Projects Agency) do Departamento de Defesa dos EUA, em 1969. Tratava-se de um programa de computador com o objectivo de racionalizar o tempo de trabalho *on-line* dos computadores entre os vários centros de informática e grupos de investigação da agência. Em 1975, a ARPANET foi transferida para a Defense Communications Agency, para facilitar a comunicação entre computadores de diferentes divisões das forças armadas, que funcionavam com protocolos TCP/IP. Em 1983, o sistema de defesa americano preocupado com violações à sua informação cria a rede MIL-NET, deixando a ARPA-INTERNET apenas para usos académicos, e entregue à National Science Foundation, que em 1987 passa a usar a ARPA-INTERNET como a sua espinha dorsal e inicia-se a privatização. Para a sociedade em geral, a internet nasceu em 1995. (Castells, 2001: 26-32).

entanto, pode parafrasear-se Duncan Watts (2004), ao afirmar que podemos dividir este ramo da matemática pura em duas componentes: a quase óbvia e a absolutamente impenetrável.

Não obstante o contributo dos SIG e do recente avanço da investigação sobre uma das suas variantes, as Ciências de Informação Geográfica (CIG)¹⁶, assim como o aparecimento da geocomputação¹⁷ (ver Cap.5), conduziram ao surgimento de um sub-ramo da Geografia dos Transportes: Os Sistemas de Informação Geográfica para Transportes (SIG-T) (cf. Cap.4). O principal responsável, quer pelo desenvolvimento do sector dos transportes em Geografia, quer pelo retomar da Teoria dos Grafos em Geografia, numa altura em que a teoria dos sistemas e as redes se tornaram o *core* da investigação da comunidade científica da actualidade, são os SIG. (Batty, 2003:2).

2.3. Medidas topológicas e propriedades dos grafos

A descrição e análise da estrutura das redes, com destaque para as redes de transportes e comunicações, são tradicionalmente uma temática de interesse dos geógrafos. (Taaffe e Gauthier, 1973:100). A grande dificuldade em descrever e analisar as estruturas e propriedades das redes de transportes e comunicações reside na sua complexidade, daí o recurso a metodologias de simplificação desses sistemas, como sejam os grafos. Os grafos permitem manipular e representar qualquer tipo de relação arco-nó, de forma a:

- Comparar redes;
- Analisar a evolução das redes;
- Analisar e medir a densidade das redes;
- Medir o diâmetro das redes;

¹⁶ Um domínio interdisciplinar no âmbito das ciências geográficas, mais focado na teoria e na metodologia associada aos SIG. (Longley et al, 2001)

¹⁷ Segundo Openshaw, a quem se atribui a autoria do termo, geocomputação “describe the use of computer-intensive methods for knowledge discovery in physical and human geography”. (Openshaw and Abrahart, 1996 citado por Banger, 2002).

- Medir a acessibilidade individual dos nós da rede;
- Medir a acessibilidade geral da rede;
- Medir a conectividade da rede;
- Analisar o impacto das redes na organização espacial;
- Analisar padrões espaciais (hierarquias, *cluster's*, centros, periferias, relações, dominância e competição).

Na bibliografia de referência podem encontrar-se vários métodos para a investigação e descrição das propriedades das redes. Inicialmente cingiam-se à elaboração de mapas e à criação de tabelas com valores das distâncias, capacidade de fluxo, índices de densidade da rede e às isócronas. A partir de meados do século XX, são desenvolvidos e aplicados novos índices para medição da estrutura das redes e da hierarquia dos nós, com o intuito de dotar a análise mais consistente, que permita a comparação e a evolução das redes. Trata-se de medidas desenvolvidas no domínio da Teoria dos Grafos e da análise topológica acerca da estrutura das redes, e.g., medidas de conectividade e ligação, índices de coesão, medidas de acessibilidade e centralidade pelo cálculo de matrizes (Wilson, 2000).

Quanto às medidas de conectividade e ligação, elas são consideradas a forma mais simples de análise da estrutura de um grafo (Haggett e Chorley, 1969:31, 32), a partir das quais é possível analisar a evolução da rede ao longo do tempo (Potrykowski e Taylor, 1984:122) ou estabelecer comparações entre si (Taaffe e Gauthier, 1973:101).

Destas medidas é possível aferir quanto às propriedades dos grafos, ou seja, quanto à simplicidade, à complexidade, à coesão, à incoerência e ao grau de desenvolvimento da rede (cf. Cap. 6), assim como também se podem estabelecer relações entre o grau de desenvolvimento de um território e a estrutura da sua rede de transportes e comunicações: “La comparación de las redes de transporte de diferentes áreas indica que los países o regiones de débil desarrollo económico están servidos por sistemas de transporte cuyas redes tienen configuraciones próximas a los grafos incoherentes o árboles. Los países de alto desarrollo económico disponen, en cambio, de redes de transporte de gran cohesión.” (Potrykowski e Taylor, 1984:124).

Todavia, para o propósito de estabelecer uma relação entre a estrutura da rede e as etapas de desenvolvimento de uma região ou país¹⁸, os investigadores mostraram-se pouco satisfeitos com as medidas de conectividade e ligação. Isto, por estarem formalmente dependentes das suas componentes básicas: o número de arcos, o número de nós e o número de sub-grafos, o que condiciona uma análise mais consistente e realística. Para superarem esta desvantagem, havia que encontrar outros índices ou um índice sintético que fosse capaz de agrupar todas as propriedades do grafo. Com base neste argumento, já Alfonso Shimbel justificava a sua investigação perante os seus pares e salientava a importância do cálculo da matriz D: “Certain parameters are defined which roughly characterize the internal structure of networks” (Shimbel, 1953:501). Trata-se de dispor a informação, acerca da relação existente entre os nós da rede, sob a forma de uma matriz binária, com um número de linhas e colunas definidos em função do número de nós da rede, e preenchida apenas com uns (1) e zeros (0), para indicar a existência de ligação directa ou não entre os nós, respectivamente.

Foi a partir do cálculo de matrizes que se foram desenvolvendo novos índices de análise às propriedades topológicas dos grafos, nomeadamente, as medidas de acessibilidade e de centralidade, que para além de permitirem a comparação entre redes diferentes, permitem também classificar e diferenciar uns nós de outros, facto de que derivou a análise da estrutura das redes, para campos que reportam a conceitos espaciais de ordem, hierarquia, relações, distância-mais-curta, proximidade e acessibilidade.

¹⁸ Garrison, W.; Marble, D. (1961) – The Structure of Transportation Networks. Washington, D.C.; US Department of Commerce, Office of Technical Services, p.62 e Kansky, K. (1963) – Structure of Transportation Networks. University of Chicago, Department of Geography. Research Paper nº 84.

Para um melhor entendimento dessas medidas topológicas (cf. Tabela 2, em anexo), considere-se os pressupostos seguintes:

- A = número de arcos
- N = número de nós
- G = grafo ou sub-grafo
- Número associado ou índice de Köning – é referente a um nó e significa a distância topológica desse nó medido em função do nó que se encontra mais afastado topologicamente na rede, considerando o caminho-mais-curto.
- Nó central – nó que apresenta o número associado mais baixo da rede.
- Diâmetro da rede – é o número associado mais elevado da rede. Indica o número de ligações (arcos) necessários para conectar os dois nós que se encontram mais afastados topologicamente na rede.
- Caminho-mais-curto – problema de otimização de redes que permite determinar qual a distância (qualquer unidade de medida) mais curta a percorrer entre quaisquer pares de nós de um grafo. Existem vários algoritmos para a resolução deste problema, se considerarmos que pode existir um valor de atrito (custo) associado a cada arco. Para grafos orientados e com custos associado, o algoritmo de resolução mais comum é o algoritmo de Dijkstra¹⁹, que permite determinar e provar qual o caminho-mais-curto, de quaisquer pares de nós de um grafo, sem arcos de custos ou pesos negativos, e sem que tenha de o comparar com todos os outros caminhos possíveis. Para grafos com arcos com custos negativos, tem-se o algoritmo de Bellman-Ford-Moore²⁰, embora mais lento computacionalmente que o de Dijkstra. Para soluções simples e especialmente adaptadas a redes reais, como as redes de transportes, o algoritmo de Shimbel ou índice de acessibilidade de Shimbel (ac) é o mais indicado. Consiste na soma da distância de um nó a todos os outros nós do grafo (cf. 2.4.2.)

¹⁹ Edsger Wibe Dijkstra (1930 – 2002), nascido em Roterdão e formado em física teórica, acabou por se dedicar às ciências computacionais, área em que desenvolveu toda a sua carreira académica. Em 1972 ganhou o prémio Turing pelos contributos fundamentais em linguagem de programação.

²⁰ O algoritmo de caminho-mínimo de Bellman-Ford-Moore (1958) é particularmente útil para grafos sem pesos, mas não aconselhável para grafos muito grandes, devido à sua lentidão processual. (Zhan, B. e Noon, C., 1998)

- Número máximo de circuitos de uma rede – é o número máximo de ligações (L_M) menos o número mínimo de ligações (L_m) necessário para se ligarem todos os nós. Para os grafos planares é: $L_M - L_m = 3(n-2) - (n-1) = 2 * n - 5$
- Medidas de conectividade e de ligação - métodos matemáticos que servem para descrever as características da rede no seu todo (a estrutura da rede).
- Medidas de acessibilidade e de centralidade – métodos matemáticos que servem para medir as características e diferenciar cada um dos nós, e uns dos outros, respectivamente.

Numa perspectiva matemática, os estudos terminam ou começam quando é possível identificar uma fórmula generalista, ou seja teoremas e corolários²¹. Na Teoria dos Grafos não são muitas as verdades demonstráveis, que se podem generalizar. No entanto, importa identificar algumas que têm repercussão na exploração das medidas topológicas para as redes em análise nesta dissertação:

Teorema 1 – Para qualquer grafo, a soma dos graus de acessibilidades de todos os nós é igual a duas vezes o número de arcos existente;

Corolário 1 – Todos os grafos, cujo número de nós seja ímpar é um grafo uniforme.

Teorema 2 – Se G for um grafo planar conectado, então qualquer grafo planar para G , terá sempre $r = e - v + 2$, em que r – região; e – arcos e v – nós, de G .

Corolário 2 – Se G é um grafo planar conectado com $e > 1$, então $e \leq 3v - 6$. O que permite demonstrar se um grafo é não-planar.

Teorema 3 – Um multigrafo não-direccionado diz-se euleriano, se, e apenas se, for um grafo conectado e todos os seus nós tenham um número ímpar de arcos a ligá-lo (grau de acessibilidade do nó).

²¹ “Um teorema não é mais do que uma verdade estabelecida e que se demonstra de forma perfeitamente convincente, a partir de outras verdades anteriormente estabelecidas. (...) Um corolário de um teorema « T » é um outro teorema que decorre imediatamente – ou quase – de « T »” (Alain, G., 1995:9)

Corolário 3 – Um multigrafo pressupõe que tenha como propriedade a existência de um caminho euleriano, mas não a de circuito euleriano, se, e apenas se, for um grafo conectado e ter exactamente dois nós com um grau de acessibilidade de valor ímpar.

Teorema 4 – Um grafo conectado com n nós, $n > 2$ tem um circuito hamiltoniano se o grau de acessibilidade de cada nó for pelo menos $n/2$.

Teorema 5 – Um grafo do tipo árvore T , com n nós tem $n-1$ número de arcos.

Teorema 6 – Nós de uma árvore T , sem quaisquer filhos (arcos que partem do nó), são chamados de nós de saída de T ; os nós que têm filhos, são chamados de nós internos de T . Cada nó interno de T tem m filhos.

Teorema 7 – Se $m = 2$, o grafo é uma árvore T bipartida.

A forma, a conectividade e a acessibilidade duma rede e das suas componentes é definida como sendo a sua topologia, ou seja, a forma como os elementos da rede (arcos e nós) estão relacionados. Neste capítulo, apresentam-se as medidas derivadas das fórmulas matemáticas da Teoria dos Grafos, que ajudam à análise das diferentes topologias espaciais das redes de transportes e comunicações, à medida que crescem, diminuem ou desaparecem alguns dos seus elementos e aferir da sua influência sobre a organização e a configuração do território.

Para concretizar este desígnio é imprescindível o recurso a algoritmia testada, conforme a que abaixo se dispõe e se explica da sua importância:

2.3.1. Medidas de Conectividade e de Ligação

O conceito de conectividade de um grafo é sobretudo importante quando se pretende:

- Comparar redes de transporte e comunicação;
- Avaliar o desenvolvimento da rede ao longo do tempo, pela identificação das configurações que desenvolvem.

Uma vez que a expansão ou intensificação das ligações entre os nós da rede é directamente relacionável com a procura das infra-estruturas de transporte para a deslocação de pessoas, bens e informação, o grau de conectividade da rede de transporte é um indicador da complexidade da organização espacial, i.e., quando o grau de conectividade da rede é maior, é também maior a complexidade espacial.

No que respeita à determinação do grau de conectividade da rede, o formalismo matemático estabelece um limite mínimo e máximo. Diz-se que a conectividade da rede é mínima, quando cada um dos nós está ligado à rede e nenhum dos nós está isolado. Consequentemente, a remoção de qualquer arco divide a rede em dois. Nestes casos, a complexidade espacial é igualmente mínima. Formalmente, a conectividade mínima expressa-se por:

$c_{\min} = (N - 1)$, em que N representa o número de nós da rede.

A fórmula permite determinar o número de arcos necessários para se ter uma conectividade mínima.

Quanto ao limite máximo, diz-se que a rede tem uma conectividade máxima quando cada nó está directamente ligado a qualquer outro nó da rede. Para o caso de grafos planares, a conectividade máxima expressa-se formalmente por:

$$c_{\max} = 3(N - 2), \in N > 2.$$

Para os grafos não-planares, o formalismo é:

$$C_{\max} = N(N - 1).$$

Em ambas os casos, esta medida significa que para cada nó que se adicione à rede, que tem de ter um mínimo de 2 nós, 3 novos arcos têm de ser acrescentados (3 novas ligações) para que a rede mantenha uma conectividade máxima.

Outras medidas de conectividade que foram surgindo na Teoria dos Grafos, para análise estrutural da rede são:

Algoritmo: **Número ciclomático** (μ) ou primeiro número de Betti (Potrykowski and Taylor (1984:123); Kansky and Danscoine, (1989))

Fórmula: $\mu = A - N + G$

Limites: $0 \leq \rightarrow \infty$

Significado: Quanto maior o valor, maior o grau de coesão da rede. Significa que existem vários circuitos (caminhos alternativos) para ir de um nó i a um nó j .

Algoritmo: **Índice de Prihar** (Cst)

Fórmula: $Cst = \frac{n(n-1)}{2a}$, em que n representa o número de nós e a , o número de arcos da rede.

Limites: $n/2 < \mu \leq n/2$

Significado: Para valores $Cst > n/2$, significa um grau de coesão máximo; para valores $Cst \leq n/2$, significa que temos uma rede de grau de coesão mínimo.

Algoritmo: **Índice alfa** (α) ou índice de redundância (Haggett e Chorley, 1969:35)

$$\text{Fórmula: } \alpha = \left(\frac{\mu}{2n-5} \right) = \frac{\text{circuitosexistentes}}{\text{max.circuitospossiveis}}$$

Limites: $0 \leq \alpha \leq 1$

Significado: Traduz a relação entre o número de ciclos observados e o número máximo possível. Numa rede cujo número de arcos é baixo, o índice assume valores próximos do zero, e à medida que o número de arcos aumenta, aumenta o índice e por conseguinte a coesão da rede, até ao valor máximo de 1. Os valores baixos indicam que estamos perante uma rede em árvore (incoerente), típica de regiões subdesenvolvidas. Valores próximos da unidade, pressupõem redes complexas típicas de regiões desenvolvidas. Dá indicação do número de conexões alternativas entre quaisquer pares de nós, ou seja, o número de caminhos possíveis.

Algoritmo: **Índice Beta** (β)

$$\text{Fórmula: } \beta = \frac{a}{n}$$

Limites: $0 \leq \beta \leq (n-1)/2$

Significado: Os valores de zero, significam a ausência de conexão e coesão; para valores que podem ir até 3, em grafos planares, significam conexão e coesão máxima da rede. Através dele é possível extrair a ideia das conexões necessárias a incorporar na rede. Permite comparar graus de coesão de diferentes redes e dá indicações acerca da complexidade topológica da rede. Quanto maior o valor, maior a complexidade.

Algoritmo: **Índice do grau de desenvolvimento** (G_p)

$$\text{Fórmula: } G_p = \frac{\frac{n^2 - n}{2 - a}}{n}$$

Limites: $G_p \geq 0$

Significado: é um índice combinatório, que indica o número de arcos que faltam para completar a rede, i.e., informa sobre as dimensões dos componentes que se tem de introduzir na rede.

Não obstante as medidas indicadas, segundo Taaffe, Gauthier e O’Kelly, as medidas de conectividade fundamentais para análise estrutural da rede são (Taaffe, *et al*, 1996:250):

- O diâmetro da rede, que denota o número de arcos ou ligações necessárias para ligar os nós mais afastados na rede. Quanto menor o seu valor, maior é a conectividade da rede. O conhecimento do diâmetro da rede é particularmente importante para o cálculo de matrizes, uma vez que indica o expoente a que se tem de elevar a matriz inicial (cf. 2.3.2);
- O índice gama (γ), é a mais representativa das medidas topológicas da Teoria dos Grafos (Taaffe e Gauthier, 1973:158) que permitem avaliar a conectividade relativa da rede. Expressa-se pelo rácio entre o número de arcos existentes numa rede e o número máximo possível. Formalmente:

$$\gamma = \frac{a}{3(N - 2)},$$

em que a representa o número de arcos existentes na rede.

Para uma melhor interpretação deste índice proposto por Kansky estabeleceram-se limites: 0.36 é o valor mínimo de γ e 1 o seu valor máximo. Para os diferentes valores compreendidos nestes limites, a rede pode classificar-se em três configurações possíveis:

1. Rede em espinha: quando a conectividade apresenta valores mínimos. Nestes casos, o índice traduz-se, para os grafos planares, no formalismo:

$$\gamma = \frac{N-1}{3(N-2)}$$

e pode variar o seu valor entre $1/3 \leq \gamma \leq 1/2$, quando $N > 4$. Significa que cada nó da rede está pelo menos ligado a um qualquer outro nó, facto que viabiliza a circulação entre quaisquer pares de nós, mas apenas por um único caminho, ou seja, não existem caminhos alternativos numa rede de conectividade mínima.

2. Rede em Delta: quando a densidade de arcos (ligações) é muito elevada face ao número de nós existentes. De notar que não se trata do oposto da rede em espinha, pois este não é um caso de conectividade quase máxima. É, no entanto, um caso de uma rede mais desenvolvida e madura. Para que a rede mantenha uma configuração em delta, sempre que um nó é adicionado à rede, dois novos arcos são exigidos ($a = 2N-3$) para valores do índice compreendidos entre $2/3 \leq \gamma \leq 1$, quando $N > 3$. Neste tipo de rede existem sempre caminhos alternativos para assegurar a circulação entre quaisquer pares de nós. A forma geométrica dominante é o triângulo e sempre que é adicionado um nó à rede, são necessárias 2 novas ligações para manter máximo o grau de conectividade e, consequentemente, a complexidade estrutural da rede no espaço.
3. Rede em Malha: trata-se de uma configuração intermédia, entre a conectividade mínima (espinha) inicial no processo de desenvolvimento da rede e a rede de maior densidade (delta), amais madura. Os valores do índice variam entre $1/2 \leq \gamma \leq 2/3$, quando $N > 4$.

Estas medidas baseadas no índice gama (γ) podem também ser usadas para identificar o momento a partir do qual a rede passa de uma configuração em espinha para uma configuração em delta, bem como para comparar diferentes estádios de evolução das redes, em regiões ou países diferentes (Taaffe *et al.*, 1996:254).

O índice gama pode também aplicar-se a sistemas não-planares. Neste caso, o formalismo expressa-se da seguinte maneira:

$$\gamma = \frac{a}{a_{\max}} = \frac{a}{\left[N(N-1)/2 \right]}.$$

Tal como o índice gama (γ), também o índice alfa (α) pode ser utilizado de forma complementar para discriminar entre as 3 configurações de base no que respeita à estrutura da rede de transporte (Taaffe e Gauthier, 1973:111). Por definição, a rede com uma configuração em espinha caracteriza-se por uma conectividade mínima e pela ausência de circuitos. Tal facto significa que o valor do índice alfa (α) é sempre nulo,

$$\alpha = \frac{(N-1) - N + 1}{2N - 5} = \frac{0}{2N - 5} = 0.$$

Ao adicionarem-se arcos a uma rede em espinha, o resultado é sempre uma reconfiguração da rede: em delta ou em malha, dependendo do número de circuitos que se criem.

Assim, para se definirem os limites para o índice alfa (α), tem de se discriminar entre:

- Configuração em Delta

$$\alpha = \frac{(2N-3) - N + 1}{2N - 5} = \frac{N-2}{2N-5},$$

- Para redes infinitamente maiores

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N-2}{2N-5} = \left[\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N}{2N-5} - \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{2N-5} \right] = \frac{1}{2},$$

- Para redes pequenas, e no caso de o número de nós ser 3, o índice alfa (α) é 1.0.

Tabela 2: Quadro síntese de medidas de conectividade para exploração da topologia da rede de transportes:

| Configuração | ÍNDICE (γ) | Observação | ÍNDICE (α) | Observação |
|--------------|----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| Espinha | $1/3 \leq \gamma \leq 1/2$ | $N \geq 4$ | 0 | $N=A+1$ |
| Delta | $2/3 \leq \gamma \leq 1.0$ | $N \geq 3$ | $0,50 \leq \alpha \leq 1,0$ | $N \geq 3$ |
| Malha | $1/2 \leq \gamma \leq 2/3$ | $N \geq 4$ | $0 < \alpha < 0,50$ | $N \geq 3$ |

O contributo das medidas topológicas de conectividade para análise da estrutura da rede de transportes, quer através de métodos de comparação estáticos, quer através da fixação de limites aos valores dos índices para avaliação do estado de desenvolvimento das redes no tempo, em três configurações básicas (espinha, delta e em malha), permite estabelecer uma relação entre as propriedades topológicas da rede e o desenvolvimento regional (Garrison e Marble, 1961).

Mas ainda assim, o facto da análise de redes estar condicionada às medidas topológicas derivadas da Teoria dos Grafos constitui um forte condicionalismo a uma investigação mais ajustada à realidade, em que as variáveis como fluxo, capacidade, distâncias físicas, tipos de uso do solo, etc. não são consideradas. Para superar alguns destes obstáculos, a Geografia contribui para desenvolver e adoptar outras medidas capazes de introduzir maior realismo na análise da rede de transportes, nomeadamente, na análise interna da rede.

2.3.2. Medidas de Centralidade e Acessibilidade: Análise de Redes pelo Cálculo de Matrizes

Para uma análise da rede de transporte e da sua influência na organização espacial, o analista não pode restringir-se às características estruturais gerais; o seu interesse tem de se estender às componentes que definem a estrutura espacial da rede, e.g., os nós e os arcos.

Enquanto as medidas de conectividade e de ligação se preocupam com o aspecto da rede, nas medidas de centralidade e acessibilidade o enfoque é sobre os nós. A matriz é um método matemático que permite trabalhar as relações num grafo, através de uma representação em forma de tabela composta por linhas e colunas onde se dispõem os nós. A tabela vai-se preenchendo através do tipo de relações que existem entre os nós do grafo, e que podem ir desde a existência de ligação directa ou não, até ao tipo ou intensidade de fluxo existente.

O cálculo de matrizes vai permitir uma análise individual dos grafos e, conseqüentemente, uma análise da acessibilidade e da centralidade de cada um dos nós. Contrariamente às medidas de conectividade e de ligação, que analisavam a estrutura geral da rede, as medidas de acessibilidade e centralidade, derivadas do cálculo de matrizes, permitem uma análise interna da estrutura da rede.

Esta é uma etapa fundamental para se examinar a relação entre a rede de transporte e a organização espacial. A este facto, Haggett e Chorley referem-se como “...the extra structural information that can be derived via matrix analysis (...) More efficient descriptions of the topologic structure of circuit networks may be obtained by treating the graph as a connectivity matrix.” (Haggett e Chorley, 1969:33-35). Potrykowski e Taylor, por seu lado afirmam mesmo que alguns índices mais simples, como o número ciclomático, os índices (α), (β), (γ) e outros, nem sempre permitem diferenciar os grafos com diferentes estruturas, sendo necessário para isso o recurso à matriz, uma vez que a forma mais simples é uma matriz binária, de uns (1) e zeros (0), consoante se verifique a existência de ligação directa entre os nós ou não, respectivamente. (Potrykowski e Taylor, 1984:133)

A partir desta análise interna à componente nó-arco é possível examinar ligações e fluxos entre nós ou apenas referenciar os nós pelas suas funções e acessibilidades ao resto da rede, e daí interpretar acerca da dominância e competição entre eles. Efectivamente, nos últimos anos, a noção de competição entre cidades e, particularmente, entre cidades europeias tem-se revelado de extrema importância (Rozemblat, 1995:22). Neste contexto, a posição de uma cidade na hierarquia da rede urbana, traçada a partir de uma rede de transporte e comunicação (estradas, ferrovias, portos, aeroportos, etc.) é um indicador precioso do seu grau de desenvolvimento

(Dupuy e Stransky, 1996:107). De uma forma abstracta, por exemplo, sempre que uma nova ligação (arco) é adicionada à rede é possível que a acessibilidade ou posição relativa de cada nó no sistema seja afectado, havendo nós que são beneficiados e outros que são prejudicados.

O cálculo da acessibilidade individual dos nós é assim um método fundamental para a determinação da hierarquia dos nós da rede (países, regiões, cidades, lugares, estações, etc.) e para a verificação das configurações espaciais que se desenham. A Teoria dos Grafos providencia a algoritmia para medir as alterações hierárquicas decorrentes das relações nós-arcos, no decurso do tempo. A análise da acessibilidade e da centralidade da rede pelo cálculo de matrizes foi a forma que os investigadores encontraram para dotar os seus estudos de maior rigor e consistência científica (Shimbel, 1953:501).

Um grafo (G) pode ser representado matematicamente através de uma matriz (M) adjacente $[N]*[N]$. Mas existem vários tipos de matrizes, dependendo do tipo de grafo (orientado ou não orientado) e de se atribuir ponderações (matrizes ponderadas) ou não, aos arcos. Pelo meio é ainda possível analisar-se a acessibilidade de cada um dos nós e a acessibilidade geral do grafo (matriz da distância topológica), assim como derivar matrizes (matrizes derivadas) por operações de álgebra, a partir da matriz inicial de conectividade, de forma a melhor compreender a estrutura do grafo, no que respeita aos percursos necessários e possíveis a percorrer para chegar de um nó a todos os outros.

Em síntese, e para uma melhor compreensão do contributo do cálculo de matrizes na análise de redes, a rede vista e representada através de uma matriz permite evidenciar 5 aspectos (Taaffe *et al.*, 1996:256):

- Posição: o número de arcos na rede é um indicador importante, conforme se viu pelas medidas de conectividade. No entanto, não é suficiente. Saber qual a posição dos arcos na rede, pelas ligações directas ou indirectas que estabelece entre quaisquer pares de nós, é fundamental.

- Ligações directas e indirectas: saber se existe uma relação directa ou indirecta entre nós de uma qualquer rede é importante, na medida que vai afectar os valores dos cálculos e, consequentemente, a interpretação daí retirada.
- Atenuação: trata-se da medida da diferença entre ligações directas e indirectas. Estas devem ser acauteladas e devidamente tratadas de forma a não enviesar os cálculos a efectuar através da matriz.
- Redundância: remete para a determinação da duplicação de ligações, a qual deve ser considerada e eliminada por mecanismos de cálculo.
- Ligações ponderadas: pensar que todos os arcos (ligações) da rede valem o mesmo pode ser um erro grave na análise de um sistema de transportes. Nestas situações deve considerar-se que existem ligações com mais importância relativa que outras, e devem ser levadas em consideração na altura dos cálculos da rede.

Com efeito, da análise de redes pelo cálculo de matrizes podem efectuar-se várias medidas e extrair diversas leituras acerca da rede. O grau de um nó, por exemplo, é uma medida que permite analisar a estrutura interna da rede mediante a medição da acessibilidade individual de cada nó. Esta medida é obtida mediante o cálculo da matriz de conectividade²² (C). Trata-se de uma matriz binária de uma rede directa, em que as linhas representam os nós de partida e as colunas, os nós de chegada. Cada célula da matriz é preenchida com 0 (sem ligação directa) e 1 (com ligação directa).

²² Para os grafos G orientados, M_{ij} = verdadeiro se e apenas se (N_i, N_j) forem arcos (A) do grafo (G). Nestes casos existem pelo menos $(N)^2$ arcos. Para grafos ditos não orientados, como são os deste trabalho, $M_{ij} = M_{ji}$ é verdade se e apenas se (N_i, N_j) são arcos de G e falso, em caso contrário. Nestes casos existem pelo menos $[N] * ([N] + 1) / 2$ arcos, e M é simétrica. Tal permite uma melhor gestão de espaço na tabela e consequentemente em disco, uma vez que basta armazenar e computar a parte superior do triângulo da M (cf. Fig. 9), já que a diagonal também não precisa de ser preenchida, M_{ij} quando $i \geq j$.

A soma das linhas $\sum_{j=1}^n C_{ij}$ representa o número total de nós na rede que estão conectados directamente com i e indica o grau de conectividade do nó respectivo.

Esta medida permite, com mais precisão que a simples observação visual do mapa da rede, estabelecer uma hierarquia dos nós. Além disso, permite ainda a avaliação evolutiva do sistema de transportes²³ à medida que o *core* se vai alterando com o tempo, considerando que a rede G no tempo t é função das características dos seus nós nos tempos $t-1$, $t-2$, ..., $t-n$. Assume-se que $G^t = f(n^t)$ e que a construção e reconstrução da rede G^t tem impacto nas características de n^t . Desta forma, a medida expressa-se formalmente por:

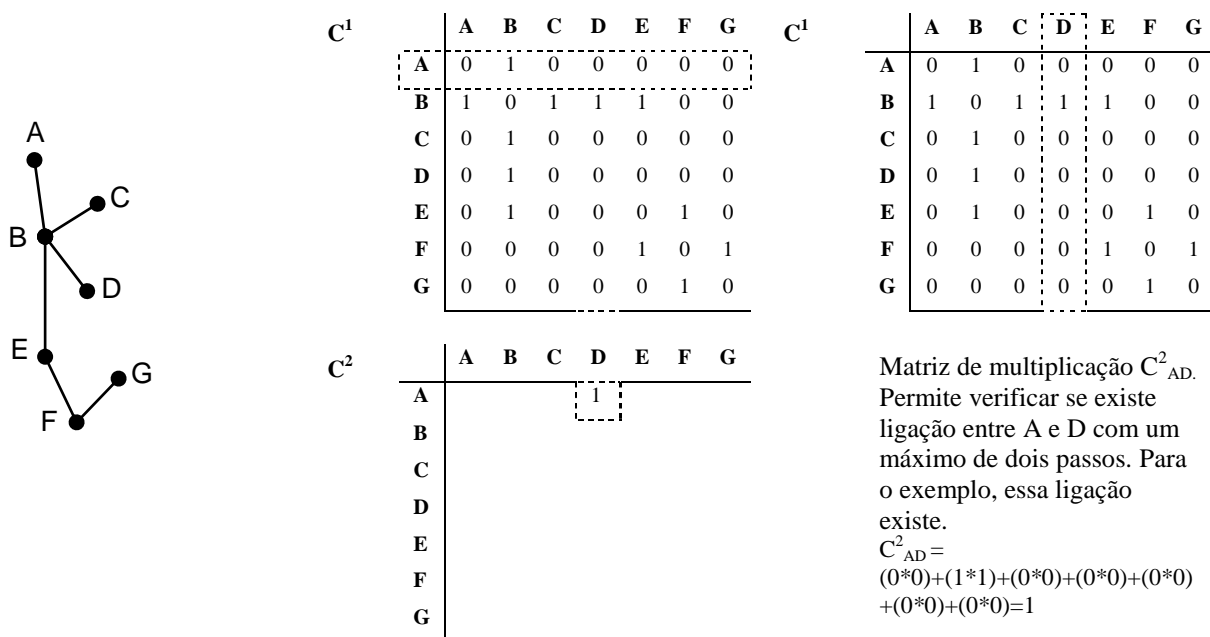
$$G^t = f(n^{t-1}, n^{t-2}, \dots, n^{t-n}).$$

Todavia, o grau de conectividade de um nó (ou grau do nó) é uma medida de acessibilidade com algumas limitações que devem ser acauteladas e consideradas apenas como uma 1ª etapa de um conjunto de medidas mais versáteis, que contemplam algumas dessas limitações, nomeadamente a inclusão das ligações indirectas (Taaffe *et al.*, 1996:259).

Efectivamente, apesar do grau do nó já acrescentar mais informação do que a retirada do índice gama (γ), porque considera a posição dos arcos (ligações), deixa ainda de fora a importância relativa da existência de ligações directas e indirectas entre os nós. Para ultrapassar esta limitação, o recurso ao cálculo de matrizes é fundamental. O processo de multiplicação de matrizes vai permitir explicitar o número de ligações directas e indirectas ou o número de passos possíveis entre cada um dos nós.

A multiplicação de matrizes consiste numa multiplicação de elemento-a-elemento das linhas de uma matriz, pela coluna de outra matriz (cf. Figura 9).

²³ cf. Black, W., 2003 – Transportation. A Geographical Analysis. The Guilford Press. London. pp. 57-58.

Figura 9 – Grafo e respectivas matrizes C^1 e C^2 Fonte: Adaptado de Taaffe, *et al*, 1973

Por exemplo, para se determinar o valor da linha A, coluna D da matriz $C^2 = C^2_{AD}$, tem de se multiplicar o valor da primeira célula da linha A da matriz C^1 , pelo valor da primeira célula da coluna D da matriz C^1 , e assim sucessivamente. No final, somam-se os produtos e obtém-se o valor da primeira célula da linha A, coluna D da matriz C^2_{AD} .

Para avaliação da conectividade da rede tem de se multiplicar a matriz de conectividade C^1 por si mesma. A matriz $C^2 (C^1 * C^1)$ representa a conectividade de cada nó a dois passos (o que inclui o vaivém). A matriz $C^3 (C^1 * C^2)$ dá a conectividade de cada nó da rede em três passos, e assim sucessivamente. A matriz C^n é uma matriz de conectividade multi-passos que se obtém ao dar a C um expoente. O valor máximo do expoente corresponde ao diâmetro da rede, que é o número de passos necessários para ligar os dois nós mais remotos da rede.

A soma $(\sum_{n=1}^n C^n)$ das n matrizes de conectividade C vai resultar na matriz de conectividade T (total), cujos valores já são o resultado das ligações directas e indirectas. A

matriz T calcula para uma determinada célula ij , o número possível de viagens de i para j , em n passos ou menos. Assim, ao invés de se ter de calcular várias matrizes C (tantas quantas o diâmetro da rede), processo pesado computacionalmente, demorado e desnecessário, para uma leitura fácil da acessibilidade de cada nó basta ter-se a matriz de acessibilidade total T . Formalmente: $T=C^1+C^2+C^3+\dots+C^n$.

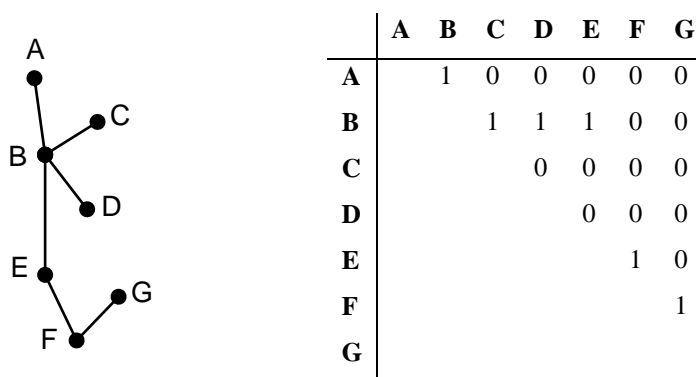
O somatório total das linhas da matriz ($\sum_{\text{linha}} T$) dá o grau de acessibilidade do nó, ou seja o número de percursos possíveis de ir de i para j , num número de passos determinado pelo diâmetro da rede. Assim, quanto maior o valor obtido, maior a acessibilidade do nó. Uma vez mais, este exercício é possível de se fazer por observação directa se a rede em causa for pequena. Mas para uma rede complexa, com centenas de nós e arcos, a ajuda dos computadores é imprescindível tornando possível identificar e medir com rigor qual o nó mais acessível, assim como também permite comparar o grau de um nó com os restantes e hierarquizá-los. É ainda possível, caso se deseje, para além da avaliação individual, determinar a acessibilidade total da rede, bastando para isso somar todos os somatórios das linhas da matriz

($\sum \sum_{\text{linhas}} = \text{acessibilidadeTotal}$), o que corresponde ao número de maneiras possíveis de cada nó estar ligado a todos os outros.

Matriz de Conectividade

A matriz de conectividade é representação mais simples das relações de um grafo. Numa matriz de conectividade²⁴ é representada a existência ou não de ligação directa entre quaisquer pares de nós. Uma matriz de conectividade é usualmente, do ponto de vista formal, representada por C . No entanto, como é possível efectuar operações algébricas de matrizes, a matriz inicial assume a designação de C^I , e designa-se de matriz de conectividade simétrica.

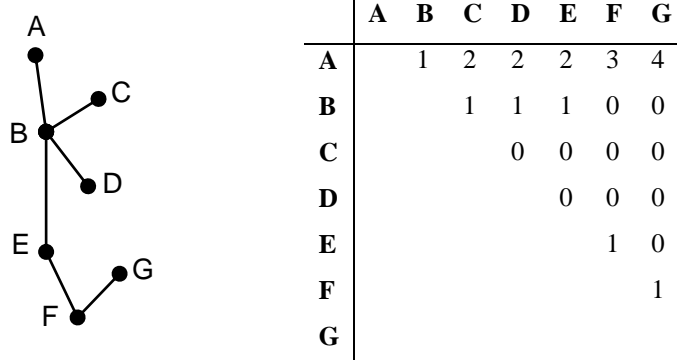
²⁴ É também usual encontrar-se na literatura da especialidade a designação de Matriz binária, por alusão à tipologia de código usada: 1, para a existência de ligação directa entre os nós; 0, para a situação inversa.

Figura 10 – Grafo e respectiva matriz de conectividade, C^I 

Conforme já confirmado, da análise e cálculo de matrizes podem-se retirar várias e muito úteis leituras acerca do grafo e das relações que nele existem. Uma dessas leituras responde por grau de um nó e indica a maior ou menor acessibilidade desse nó no grafo, o que é um registo da importância relativa de um nó no grafo. O grau de um nó corresponde assim ao número de arcos que convergem para o nó, e que se pode determinar pelo somatório de ‘uns’ (1), de cada nó na relação directa com os outros nós da matriz. Esta é uma medida facilmente determinada visualmente numa rede simples, mas quando se trata de redes complexas, com centenas ou mesmo milhares de nós e arcos, o recurso às matrizes é imprescindível. No exemplo ilustrado pela Figura S, o nó mais acessível é o nó B, com um grau de 4.

Numa matriz de conectividade, o grau de um nó é calculado facilmente pelo somatório da linha. No entanto, pode construir-se uma outra matriz: a matriz de distâncias topológicas (D), em que se representa para cada par de nós, o número de arcos necessários para que se liguem seguindo sempre o caminho-mais-curto (cf. Figura 11). Para se determinar o grau de acessibilidade dos nós a partir da matriz D , basta verificar na matriz qual o nó que apresenta maior número de mínimas distâncias topológicas, ou seja, o nó que tem mais vezes o número 1 repetido. Ao ler-se a matriz D , verifica-se que o nó B repete o valor 1 quatro vezes.

Figura 11 – Grafo e respectiva matriz de distâncias topológicas, D



Mas, de uma matriz D , é ainda possível determinarem-se outras medidas topológicas de acessibilidade, como sejam:

Algoritmo: **índice de acessibilidade de Shimbel (D)**

$$Di = \sum_{j=1}^n dij$$

Significado: representa a soma das distâncias topológicas de um nó a todos os outros, do grafo, ou seja, indica o número de arcos a percorrer, num caminho-mais-curto, para se chegar de um nó i ao nó j .

Algoritmo: **índice de acessibilidade média de Shimbel (D_t)**

$$Dit = \frac{\sum_{j=1}^n dij}{n - 1}$$

Significado: representa a média do somatório das distâncias topológicas de um nó a todos os outros nós do grafo.

Algoritmo: índice de acessibilidade geral do grafo ou índice de dispersão total (d)

$$d = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n dij$$

Significado: representa o somatório dos somatórios das distâncias topológicas de todos os nós entre si, o que dá um valor indicador da dispersão total do grafo, ou seja, quanto mais alto o valor, maior a dispersão do grafo.

Algoritmo: índice de acessibilidade geral ou índice de dispersão médio (D)

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n dij}{(n-1) * n}$$

Significado: é a média dos somatórios das distâncias topológicas de todos os nós do grafo entre si, o que dá a indicação do valor de dispersão médio do grafo. É útil quando se quer comparar grafos de diferentes complexidades e geometrias da sua estrutura.

Da leitura destes valores é ainda possível retirar mais três indicadores que não só reforçam e complementam a interpretação que se pode retirar das medidas acima, como também contribuir, quer para caracterizar a estrutura do grafo, quer para identificar e classificar os nós do grafo, quanto à sua acessibilidade e centralidade, a saber:

Número associado ou índice de Koning – é uma medida da distância topológica mais elevada de um nó, ou seja corresponde à distância topológica de um nó ao nó que se encontra mais afastado topologicamente no grafo, através do caminho-mais-curto.

Nó central – é aquele que possuir um número associado mais baixo.

Diâmetro da rede – corresponde ao valor mais elevado determinado pela matriz D . Tendo como exemplo a figura W, o grafo apresenta um diâmetro 4, que corresponde à

maior distância topológica observada (cf. número associado).

Matrizes derivadas

As matrizes derivadas permitem ao analista obter grandezas da complexidade do grafo mediante o cálculo do número de percursos diferentes que é possível efectuar entre quaisquer pares de nós, usando um número de arcos igual a i . Formalmente, uma matriz derivada determina-se a partir da matriz inicial de conectividade e assume a designação de ordem superior: C^2, C^3, \dots, C^n ou $T^1, T^2, T^3, \dots, T^n$.

Matriz $C^2 = C^1 * C^1$ (matriz de segunda ordem), que indica o número de ligações possíveis entre quaisquer pares de nós, usando apenas 2 arcos.

Matriz $C^3 = C^2 * C^1$ (matriz de terceira ordem), que indica o número de ligações entre quaisquer pares de nós, usando apenas 3 arcos.

Matriz $C^n = C^1 * C^1 * C^1 * \dots * C^1$ (n vezes) que dá conta do número de ligações entre quaisquer par de nós, usando apenas n arcos.

Quanto às matrizes T_i , estas indicam quantas ligações diferentes são possíveis entre quaisquer pares de nós, usando i ou menos arcos.

Matriz $T^1 = C^1$.

Matriz $T^2 = C^1 + C^2$ para se determinar o número de ligações diferentes entre quaisquer pares de nós, usando 2 ou menos arcos.

Matriz $T^3 = C^1 + C^2 + C^3$ para se determinar o número de ligações diferentes entre quaisquer pares de nós, usando 3 ou menos arcos.

Matriz $T^n = C^1 + C^2 + C^3 + \dots + C^n$ para determinar o número de ligações diferentes entre quaisquer pares de nós, usando n ou menos arcos.

A importância e o contributo das matrizes T , para a avaliação da complexidade do grafo e de como isso se reflecte na acessibilidade e na centralidade, é medida a partir do número de ordem (n) que irá ‘esgotar’ a matriz, ou seja, permite saber qual o número de ordem da matriz $T(n)$, em que deixam de existir zeros. Desta forma, é possível determinar a medida de acessibilidade dos nós (pelo somatório dos valores das linhas) e da acessibilidade geral do grafo (pela soma de todos os elementos da matriz). A medida de acessibilidade será tanto maior, quanto maior for o valor obtido. Esta matriz caracteriza-se por um refinamento da medida de acessibilidade aferida, face à matriz C , uma vez que analisa não apenas as ligações directas (como a matriz C), mas também as ligações indirectas. Desta forma, a hierarquia dos nós será mais discriminante e, por conseguinte, mais representativa da realidade. O grau de discriminação verificado entre a matriz C e a matriz T será tanto maior quanto mais complexa for a rede em análise, isto é, quanto mais nós e arcos existirem.

Não obstante a sua importância, às matrizes derivadas assiste o problema do seu crescimento rápido, a partir da matriz de conectividade C , o que condiciona o cálculo e respectivo processamento, já que da soma e da multiplicação dos valores iniciais chega-se rapidamente a valores muito grandes.

Para minimizar este problema, sem perca das vantagens inerentes ao cálculo de matrizes, Garrinson (1961) propôs as matrizes TGi , em que as sucessivas matrizes Ci são multiplicadas por um coeficiente S (com valores compreendidos entre 0 e 1, sendo que 0,3 é o valor mais vulgar), o que permite uma diminuição do condicionamento provocado pelas multiplicações mais longas em favor da obtenção de valores mensuráveis.

Matriz $TG^n = S * C^1 + S^2 * C^2 + \dots + S^n * C^n$ corresponde de forma proporcional ao número de ligações diferentes possíveis entre quaisquer pares de nós, usando n ou menos arcos, multiplicados pelo coeficiente S .

Matrizes ponderadas

As matrizes ponderadas constituem uma outra forma de análise topológica, uma vez que permitem atribuir pesos aos arcos e assim colmatar algumas das deficiências existentes nas medidas topológicas dos grafos (Abreu, 2005):

- Equivalência – todos os nós são considerados equivalentes e como tal, tendo importância equiparável, assim como os arcos;
- Localização – também já identificado para este trabalho, a análise topológica dos grafos negligencia o ‘onde?’, em favor das relações entre os nós;
- Atenuação – as diferenças entre ligações directas e indirectas (e entre diversos graus de indirectas) podem ser muito importantes, mas não são assumidas como tal;
- Redundância – não se consegue eliminar os círculos, as viagens ida e volta, quer no todo, quer em partes do grafo, e que só geram ‘ruído’ e atrasam o processamento da algoritmia;
- Ligações – embora assumidas como equivalentes, elas são muitas das vezes diferentes, no que respeita a distâncias, intensidades, etc.

Se o recurso aos SIG e à geocomputação constituem uma preciosa ajuda para ultrapassar algumas das deficiências das análises topológicas, as matrizes ponderadas (L_i) vêm complementar e providenciar maior rigor, uma vez que com a matriz D , ainda que sejam eliminadas as redundâncias, a distância tem uma métrica topológica, medida em função do número de ligações entre os nós e, por conseguinte, atribuindo igual valor a todas as ligações (leia-se arcos). Com a matriz L , as distâncias são reais e cada ligação é ponderada em acordo com a distância física entre os nós, independentemente da unidade de medida.

De uma perspectiva gráfica, as matrizes ponderadas são igualmente compostas por linhas e colunas diferindo das outras apenas nos valores que preenchem as suas células, as quais correspondem a pesos que representam uma qualquer característica dos arcos. Esta característica tanto pode ser aditiva, como é vulgar no caso das distâncias, como multiplicativa, cujo exemplo típico é o do coeficiente de dificuldade, normalmente expresso em medidas de probabilidade, grau de aptidão ou nível de atrito, na comunicação e no fluxo entre quaisquer nós.

Assim como na matriz binária de conectividade ou na matriz derivada inicial, a matriz ponderada também principia pela ordem primária (L^1), de cargas do grafo. Sendo que para uma matriz ponderada L^2 , tem-se:

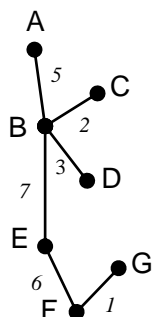
$$L_{ij}^2 = \min(L_{ik}^1 (k = 1, \dots, n) + L_{jk}^1 (k = 1, \dots, n))$$

Consequentemente, os valores das matrizes L^n são também o mínimo da soma dos respectivos valores nas matrizes de ordem $n-1$, o que significa duas alterações relativamente aos procedimentos tidos para as matrizes anteriores:

- Invés da multiplicação elemento-a-elemento, linha-vezes-coluna, tem-se agora um procedimento de adição elemento-a-elemento; e
- Invés da soma dos resultados, o valor que se pretende é o valor mínimo $[x+y=\min(x*y)]$.

Para uma clarificação do que acima foi descrito, atente-se ao seguinte exemplo (Figura 12):

Figura 12 – Grafo e respectivas matrizes L^1 e L^2



$$L^1$$

| | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| A | 0 | 5 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| B | | | | | | | |
| C | | | | | | | |
| D | | | | | | | |
| E | | | | | | | |
| F | | | | | | | |
| G | | | | | | | |

$$L^1$$

| | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|----------|---|----------|
| A | | | | | ∞ | | |
| B | | | | | 7 | | |
| C | | | | | ∞ | | |
| D | | | | | ∞ | | |
| E | | | | | | 0 | |
| F | | | | | | | 6 |
| G | | | | | | | ∞ |

$$L^2$$

| | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|----|---|---|
| A | | | | | 12 | | |
| B | | | | | | | |
| C | | | | | | | |
| D | | | | | | | |
| E | | | | | | | |
| F | | | | | | | |
| G | | | | | | | |

Fonte: Adaptado de Taaffe, *et al*, 1973

Note-se ainda que sempre que não exista ligação directa entre quaisquer dois nós, a célula adquire o valor de infinito; caso contrário, isto é, caso exista uma ligação directa entre os nós, então a célula assume o valor da distância entre os nós respectivos.

Assim, a matriz L^2 representa a mínima ligação, a dois passos, entre A e E. Ou seja, o somatório dos percursos possíveis entre os nós A e E, a dois passos, um valor mínimo de 12. Senão veja-se:

$$(A - A) + (A - E) = 0 + \infty = \infty$$

$$(A - B) + (B - E) = 5 + 7 = 12$$

$$(A - C) + (C - E) = \infty + \infty = \infty$$

$$(A - D) + (D - E) = \infty + \infty = \infty$$

$$(A - E) + (E - E) = \infty + 0 = \infty$$

$$(A - F) + (F - E) = \infty + 6 = \infty$$

$$(A - G) + (G - F) = \infty + 1 = \infty$$

O objectivo das matrizes ponderadas é que o processo de matrizes continue até que fiquem preenchidos todos os elementos da matriz, com a excepção da diagonal. Note-se que a matriz L não vai providenciar mais informação acerca da estrutura da rede do que aquele que já se obtém pelas outras matrizes topológicas. Todavia, a vantagem da matriz L é que permite obter um valor referente à acessibilidade dos nós, baseado numa medida de distância mais refinada, porque assente em métricas físicas invés de topológicas.

Mas, se é claro, conforme o testemunham diferentes investigadores (Ascher, 2001; Haggett, 2001; Taylor, 2004 e Gaspar, 2006), apenas para citar alguns com obras publicadas mais recentemente, que as redes de transporte e comunicação são as artérias que alimentam os aglomerados populacionais, e que delas depende a vida, o crescimento, o declínio ou morte desses aglomerados, e sendo estes componentes de uma estrutura maior que é o território no seu todo, então é legítimo dizer que estas redes têm uma função estruturante no território, pois delas depende a articulação e o relacionamento entre os componentes. Está-se assim perante uma forma simplificada da realidade, com o território composto por redes.

Até meados do século XX, a Teoria dos Grafos baseou-se exclusivamente na tentativa de descobrir mais acerca das propriedades das redes e da beleza matemática que continham, do que propriamente da sua estrutura, dinâmica e aplicação. Só passados quase dois séculos é que os cientistas iniciaram uma nova abordagem com base empírica, e com as ciências sociais à frente:

Sociologia e a Psicologia (Milgram, 1967; Travers e Milgram, 1969), mas também a Geografia. Só a partir desta data, embora de forma descontinuada (sobretudo no que se refere à Geografia), a investigação passa a centrar-se nas questões relacionadas com a génese das redes e do que releva das relações entre as suas componentes, ou seja, como se formam. Que leis estão na sua origem? Que leis regem a sua estrutura? Que tipo de relações estabelecem e se existem padrões ubíquos para todo o tipo de redes? Desencadeia-se um novo objecto de estudo interdisciplinar, e para alguns, uma nova ciência (Barabási, 2003) e uma nova metodologia.

3. Redes complexas

Após a ‘descoberta’ da Teoria dos Grafos, por Leonhard Euler em 1736, a mensagem que ficou foi a de que os grafos permitem evidenciar as propriedades, que as redes têm escondidas nas suas estruturas e que limitavam a forma como até aí eram vistas e trabalhadas. Todavia a história e a ciência têm um tempo próprio para avançar, e só após dois séculos de *status quo*, na passagem ao séc. XXI, é que a Teoria dos Grafos veio despoletar o desenvolvimento de uma nova teoria e uma nova forma de fazer ciência: a Teoria das redes¹ ou as Redes complexas². “...the world has changed several times (...), and my world with it. (...) the world has learned the hard way that it is connected in a matter that few people had anticipated and no one understood. (...) a new science has been emerging – one that speaks directly to the momentous events going on around it (...) and unlike the physics of subatomic particles or the large-scale structure of the universe, the science of networks is the science of the real world” (Watts, 2004).

A Teoria das redes, apesar de constituir matéria de investigação recente, tem sofrido significativos saltos teóricos, fruto de um forte investimento de recursos, de uma capacidade tecnológica evoluída e de grandes bases de dados (Cardillo, *et al*, 2006), que têm providenciado sucessivas ondas de experimentações e a formulação de diferentes e novos

¹ Teoria das redes ou redes complexas são ambos termos que é comum encontrar na literatura da especialidade e que significam o mesmo. Nesta dissertação, apesar de se ter optado pelo termo Redes Complexas para título de capítulo, faz-se uso de ambos consoante se considerou mais útil ao entendimento do texto.

² Sistema complexo é aquele em que o todo é mais do que a soma das partes. Segundo Tenedório, um sistema complexo é “qualquer um que envolva determinado número de elementos, organizados em estruturas que podem existir em diversas escalas. Estes sistemas passam por processos de transformação que não são passíveis de serem descritos por uma única regra, ou seja, não podem ser reduzidos a um único nível de explanação” (2006). Utilizando uma analogia simples, não se pode compreender o cérebro através da análise de um neurónio, tal como não se sabe tudo acerca da rede urbana de um País só pelo estudo de uma cidade.

modelos. Esta mudança de paradigma no estudo das redes, agora mais focada na dinâmica da sua estrutura interna (Watts; Strogatz, 1998) ou na estatística mecânica da sua estrutura colectiva (Barabasi, 2002), procura leis universais na evolução e dinâmica das redes, inclusive das redes geográficas (O'Sullivan, 2000; Batty, 2001; Jiang, 2006; Xu, 2007). Segundo Cardillo, *et al*, 2006, as redes geográficas (ou espaciais) são uma classe especial das redes complexas, cujos nós existem num espaço euclideano bi ou tri-dimensional, e cujos arcos não representam relações abstractas (como as relações entre indivíduos, nas redes sociais), mas sim relações físicas reais, nomeadamente redes de transporte.

Da teoria da aleatoriedade, passando pelas teorias do Mundo pequeno de Milgram (1967), com o coeficiente de *clustering* e Watts e Strogatz, baseadas nas redes sociais, até à teoria do efeito *hub* e das redes *scale free*³ de Barabási e sua equipa, sobre a internet e a *www*, e seguindo pelas redes biológicas e químicas, a teoria das redes tem evoluído, dispersando-se por vários domínios científicos e caracterizando-se pela ubiquidade das suas propriedades (Strogatz, 2001). A Teoria das redes é o mais entusiasmante objecto de investigação científica do século XXI e representa a mais recente revolução científica: a ciência das redes (Dorogovtsev e Mendes, 2003; Barabási, 2003: 6-8). As redes são omnipresentes nas nossas vidas e desempenham um papel determinante, sobre a forma como nos relacionamos, como evoluímos geneticamente, como raciocinamos, como nos movimentamos no espaço, etc., sendo a ciência das redes por excelência uma ciência interdisciplinar. (Bersini, 2005).

Apesar do interesse dos geógrafos pelo estudo das redes de transportes e comunicação se manifestar com alguma intensidade desde a década de 60 do século XX (Shimbel, 1953; Kansky, 1960/3; Garrison, 1960; Nystuen e Dacey, 1961; Garrison e Marble, 1962; Taaffe *et al*, 1963; Haggett e Chorley, 1969), com o início da década de 70 e 80, ocorreu um afastamento não apenas do tema, mas também das metodologias de base matemática, resultado de uma dispersão dos geógrafos por outros assuntos. Assim, apesar da interdisciplinaridade dos estudos acerca desta nova ciência, o cunho que se lhe confere é predominantemente de base Matemática e de base Física, ficando a Geografia, mesmo nos estudos acerca das redes de infra-estruturas espaciais, isto é, redes de transportes e comunicações, ignorada (Gorman e Kulkarni, 2003; Gastner e Newman, 2006; Xu e Sui, 2006), no que respeita às propriedades Mundo pequeno e influência destas sobre o território.

³ De agora em diante passa-se a referir como Redes sem escala.

Pelo carácter interdisciplinar e pelas descobertas que tem acumulado por diferentes áreas do saber, por ter uma base matemática originária na Teoria dos Grafos e sobretudo pela incipiente aplicação na Geografia – apesar do apelo de Michael Batty, que de resto constitui motivação suficiente para se abordar o estudo das redes como “contemporary geographical theory applicable and practicable” (Batty, 2003:3) –, a Teoria das redes e os modelos empíricos desenvolvidos são fundamentais para uma Geografia das redes, assente nas relações (Sui, 2004; Jiang, 2006), na dinâmica dos componentes, e na complexidade que as caracteriza, ao invés de uma geografia das localizações, estática e reducionista. Que percurso histórico as Redes complexas têm traçado? Quais os principais precursores das Redes complexas? Que modelos encerra e que descobertas foram sendo feitas? Que implicação e aplicação tem em Geografia? São algumas das questões que se propõe responder neste capítulo.

3.1. A teoria da aleatoriedade

Paul Erdős e Alfred Rényi são dois matemáticos húngaros que em 1959 contribuíram para uma nova etapa na evolução da Teoria das redes, ao criarem a teoria da aleatoriedade (Barabási, 2003: 16-24; Watts, 2006:43), resultado da combinação entre o modelo dos grafos aleatórios e o conceito de probabilidade. O conceito de probabilidade, teve cronologicamente origem nos jogos de azar e tinha o propósito de medir a probabilidade de ocorrência, ou não, de determinado fenómeno através da aplicação do quociente entre o número de casos favoráveis e o número de casos possíveis.

O modelo dos grafos aleatórios consiste num conjunto de n nós a que se vão adicionando aleatoriamente arcos de forma a ligá-los. No entanto, diferentes grafos aleatórios produzem diferentes probabilidades de distribuição, ou seja, para um determinado grafo G ele é função de (n, p) , em que n representa os nós e p , a probabilidade de um arco se ligar a um determinado nó. Para Erdős e Rényi, as redes formam-se aleatoriamente. Os nós já existem ou podem ir surgindo posteriormente à medida que a rede aumenta (podem ser pessoas, no caso de uma rede social; podem ser células, no caso de uma rede biológica; podem ser computadores, no caso de uma rede informática, etc.) e os arcos que os ligam e formam as redes surgem casualmente.

As regras que gerem e estão na formação das redes, dos mais variados domínios (sociais, Internet, biológicas, económicas, transportes, geográficas, entre outros), são diversas e muito diferenciadas. Encontrar um modelo que sirva, não só para analisar e compreender os mecanismos estruturais e individuais que caracterizam as redes de um determinado domínio, mas sim todas as redes é o objectivo principal dos cientistas, a saber, a procura de modelos que demonstrem verdades universais, que é o mesmo que dizer, encontrar soluções simples para problemas complexos.

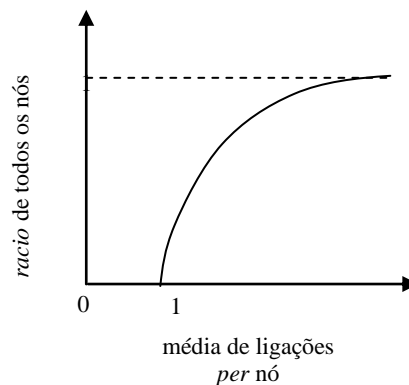
Quando Erdős e Rényi propuseram a teoria da aleatoriedade estavam a propor exactamente isso. Uma solução simples, que o formalismo matemático podia suportar, para uma realidade complexa, cujas soluções tardavam. “Since different systems follow such disparate rules in building their own networks, Erdős and Rényi deliberately disregarded this diversity and came up with the simplest solution nature could follow: connect the nodes randomly.” (Barabási, 2003:17) Qual então a mensagem na teoria da aleatoriedade de Paul Erdős e Alfred Rényi? A premissa da teoria reside em dois princípios:

- O princípio da igualdade, ou da democracia das redes. Considerando que os arcos ligam os nós ao acaso, formando assim as redes, pode conceber-se a ideia de que todos os nós têm a mesma probabilidade de pertencer à rede (podem existir nós que não pertencem a nenhuma rede), i.e., serem conectados à rede. Num grafo aleatório não existe nenhum critério que privilegie umas ligações em relação a outras, logo caracteriza-se pela probabilidade p de se estabelecer uma ligação $n(n-1)/2$ de quaisquer n nós. Formalmente, o número médio de arcos que um nó tem, expressa-se por $p(n-1)$, uma vez que cada ligação serve dois nós.
- O princípio, a que os físicos chamam de transição⁴. Considere-se uma situação em que existem mil botões no chão e que, ao acaso, se comece a ligá-los por fios. Quando se tem apenas um fio a ligar dois botões, significa que a rede terá apenas dois botões numa fracção de mil, o que dá um rácio de quase 0; pelo contrário, caso se ligue cada botão com todos os outros, então tem-se a rede completa e o rácio será de 1. A questão agora é: qual o rácio para todas as situações intermédias? Como será normal, no início vai ligando-se botão-a-botão,

⁴ Phase transition (Watts, 2006:46)

provavelmente botões isolados, mas a determinada altura, quando já se tiver um número significativo de fios a ligar botões, i.e., quando cada botão já tiver em média um fio que o ligue à rede, então a fracção do grafo passa subitamente de 0 (o que indicava desconectividade) para 1 (total conectividade). Este princípio da transição é consensualmente tido pela comunidade científica, como uma característica dos sistemas complexos.

Figura 13 – Princípio de transição, na teoria da aleatoriedade



Adaptado de Barabási, 2003

Apesar da simplicidade do formalismo, a teoria dos Grafos aleatórios de Erdős e Rényi está carregada de uma sofisticada componente analítica e serve de base de explicação para muitos fenómenos de sistemas complexos, e.g, difusão de epidemias, rumores, informações ou mesmo modas culturais e comerciais (Watts, 2004:46-47). De facto, o princípio de transição, ou seja o arco que liga os nós, e que permite que o grafo passe de uma fase de isolamento para uma fase de total conectividade, tem a particularidade de ser capaz de distinguir quais os nós que são componentes ou não de um determinado sistema (caso não se estabeleça uma ligação entre alguns dos nós existentes, então é porque esses nós simplesmente não faziam parte do sistema, i.e., da rede), assim como da velocidade e dispersão da informação, i.e., do fluxo da informação (doenças, pessoas, dinheiro, boatos, etc.) na rede.

Apesar do avanço dado na exploração de leis que as redes encobrem, a Teoria da aleatoriedade proposta por Erdős e Rényi foi alvo de crítica pelos seus pares, com base no testemunho de que as ligações não ocorrem ao acaso; pelo contrário, as pessoas, por exemplo, tendem a estabelecer relações preferenciais. O mesmo se passa noutras redes, que não a

social. Veja-se, por exemplo, o que se passa no domínio da biologia. As moléculas que compõem o corpo Humano, caso se relacionassem ao acaso, a informação que passa entre elas permitiria, por exemplo, que se escrevesse esta dissertação? Não.

A conclusão a que se chegou, é que as redes do mundo real não podiam ser explicadas com base apenas na teoria da aleatoriedade. (Watts, 2006:47). Mas então porque é que dois matemáticos brilhantes como Erdős e Rényi não pensaram nisto? Porque ambos estavam mais interessados na beleza matemática e na descoberta feita do que na aplicabilidade que ela poderia ter para a compreensão e resolução de problemas reais (Barabási, 2003:23). É a propriedade da rede e a beleza do formalismo matemático que monopolizava o interesse dos autores e não a estrutura ou aplicabilidade real das redes e da teoria que encerra.

3.2. A teoria do ‘Mundo pequeno’ e dos seis graus de separação

Em 1929, um jovem escritor húngaro de nome Frigyes Karinthy publicou um livro com uma série de pequenos contos. Um desses contos intitulava-se: “‘Láncszemek’ or ‘Chains’” (Watts e Strogatz, 1998), onde o autor escrevia que qualquer pessoa no Mundo, está apenas a cinco conhecimentos-intermédios de qualquer outra. Um vendedor de gelados em Lisboa e um prémio Nobel da Física; um aluno de geografia da universidade de Lisboa e um cozinheiro *gourmet*, nos Estados Unidos. Todos separados por um máximo de 5 pessoas até encontrarem alguém que pudesse estabelecer uma ligação entre os dois. Esta tese de Karinthy, revolucionou a Teoria dos Grafos e deu o mote para o estudo empírico do psico-sociólogo Milgram, (1967): a teoria Mundo pequeno, que acabou por ficar célebre como, a teoria dos seis graus de separação⁵.

Não é conhecido que o termo ‘Mundo pequeno’ tenha sido alguma vez proferido por Milgram. Segundo se sabe, o termo foi inventado por John Guare em 1991, quando deu o título a uma peça de teatro, de grande sucesso na Broadway e que mais tarde originou o filme de mesmo nome (Barabási, 2003:29). Não obstante, foram os estudos de Milgram que originaram a teoria, ainda que sem o cunho mediático que Guare depois lhe deu porque obviamente, existem muito mais pessoas a interessarem-se por teatro e cinema do que por

⁵ Milgram, S. (1967) - The Small-World Problem. *In Psychology Today*, vol.1, nº1. Ver também: Watts, D. (2004) - Six degrees. The science of a Connected Age.

artigos científicos sobre a teoria das redes.

O empirismo dos estudos de Milgram pretendiam arranjar uma forma de demonstrar e verificar a distância, medida em número de pessoas, entre quaisquer duas pessoas nos Estados Unidos. A experiência baseou-se na seguinte metodologia (Milgram, 1967:64):

- Escolher duas pessoas-alvo (a esposa de um estudante graduado de Massachusetts, residente em Omaha, Nebraska, que representa a população de início; e um corretor da bolsa, a residir em Sharon, Massachusetts, que representa a população-alvo);
- Escolher as cidades para onde procuraria as pessoas-contacto (Wichita, Kansas, Omaha);
- Escrever e enviar cartas, para algumas pessoas escolhidas ao acaso, residentes nestas cidades. Nessas cartas, Milgram pedia às pessoas para participar neste estudo, sobre a sociedade americana, da Universidade de Harvard.

As cartas continham uma pequena descrição do estudo, uma fotografia, nome e endereço das pessoas-alvo, e instruções de como a pessoa quem recebesse a carta, devia proceder. As instruções eram:

- Adicionar o seu nome no rosto e fundo de página, da folha enviada na carta, para que a pessoa que em seguida recebesse a carta, pudesse identificar o remetente anterior e melhor perceber o propósito da experiência;
- Destacar um dos postais contidos na carta, o preenchesse e o reenviasse para a Universidade de Harvard. Isto era muito importante, porque permitia a Milgram seguir o percurso da carta;
- Caso conhecesse pessoalmente a pessoa-alvo identificada, pedia o favor de lhe enviar a carta directamente;
- Caso não conhecesse pessoalmente a pessoa-alvo indicada, então que fizesse seguir a carta para um conhecido seu, que considerasse poder conhecer pessoalmente a pessoa-alvo. Pedia o favor de não tentar contactar a pessoa-alvo.

Apesar de algumas mentes mais cépticas, a experiência de Milgram acabou por permitir-lhe concluir que, em média, apenas 5,5 pessoas-contacto ou seis graus de separação, intermedeiam quaisquer duas pessoas no mundo. Segundo Milgram, vivemos numa sociedade em rede, na qual ninguém está desconectado, antes pelo contrário estamos todos à distância de “...a few handshakes from anyone else”. (Barabási, 2003:30) ie. vivemos num ‘Mundo pequeno’ (Watts e Strogatz, 1998).

Todavia, e apesar do sucesso da experiência e de vencido o cepticismo de alguns dos seus colegas, a teoria não estava imaculada de falhas e muito menos isenta de críticas. Alguns anos mais tarde, começam a surgir algumas questões sobre o que se passará noutras redes, que não as sociais. Será que a teoria dos seis graus de separação se aplica igualmente a outras redes, como por exemplo, a Internet? Será que uma rede gigantesca, como a da Internet, com biliões de nós, também se resume a um ‘Mundo-pequeno’? Será que a Teoria das redes permite ‘encolher o mundo’? Será que a teoria do Mundo-pequeno contém um formalismo adaptável à topologia da Teoria dos Grafos?

Se virmos a questão sob uma perspectiva puramente matemática, conforme Watts explica (2004:39), então o mundo em que se vive é efectivamente pequeno. Tem-se essa noção, e com frequência se diz, quando num evento de natureza social, alguém é apresentado a alguém, e menciona um amigo ou conhecido, que surpreendentemente (ou não) é também amigo ou conhecido de outra pessoa. Mas voltando à perspectiva matemática do Mundopequeno, considere-se que uma pessoa tem cem amigos, e que cada um desses cem amigos tem também cem outros mais amigos. Segundo a teoria das redes (e dos grafos), a pessoa inicial estaria a apenas a dois graus (duas ligações) de cem vezes cem pessoas amigas, ou seja, dez mil pessoas; a três graus, seria amigo de perto de um milhão de pessoas; a quatro graus, cem milhões de pessoas, e a cinco graus, cinco biliões de pessoas, o que é mais ou menos a população do mundo.

Sintetizando, pode dizer-se que essa pessoa está a seis graus de distância de qualquer outra pessoa do mundo. Assim, apesar de o estudo ter base empírica, faltava-lhe profundidade científica, que só veio a acontecer com o formalismo de Watts com o recurso à Teoria dos Grafos (Watts e Strogatz, 1998). É a partir deste ponto que a Teoria das redes adquire no seu formalismo os princípios topológicos da Teoria dos Grafos e, simultaneamente, se percebe a

falácia e dificuldade matemática do Mundo pequeno.

Por outro lado, se olharmos para a questão do Mundo pequeno, numa perspectiva social, então começa-se logo por achar estranho o facto de alguém ser amigo de cem pessoas. A amizade é rara, além de que a probabilidade de dois amigos de um amigo comum serem amigos não pode ser igual à probabilidade de quaisquer duas pessoas no mundo.

Considere-se então um número mais razoável, de 10 amigos e pergunte-se a esses dez amigos para indicarem quais os seus dez amigos. A probabilidade de se encontrar amigos comuns é muito grande, como será natural. Além disso, a rede não é estática, ela tem tendência a desenvolver-se. Esta observação, apesar de não retirar a importância e validade da teoria do Mundo pequeno de Milgram, acrescenta uma nova visão das coisas. O Mundo é pequeno, mas é também altamente organizado em *cluster's* e varia com o tempo. Daqui se formalizou o que agora se designa na literatura da especialidade por Problema do Mundo pequeno: um mundo em rede, em que os nós estão em média a distâncias muito curtas uns dos outros (elevada conectividade), e que formam *cluster's* entre si (Watts, 2004; Jiang, 2006; Xie e Levinson, 2006; Xu e Sui, 2007).

Sobre a problemática do Mundo pequeno e da sua aplicabilidade geográfica, já Batty afirmava que aí poderia residir a chave para a compreensão do crescimento e do funcionamento das cidades. “No one so far as tried to develop small world theory for cities but, in the quest to see how our cities function and might function better, a new understanding is needed. The current fascination for network growth is general and small world theory in particular might hold the key.” (Batty, 2001: 638), o que coloca o assunto como um problema interessante de um ponto de vista geográfica. A este propósito, Sui explora a relação entre o Problema do Mundo pequeno e a Geografia, fazendo menção à Primeira Lei da Geografia ou *Tobler's Fisrt Law* (TFL). Segundo Sui, e do ponto de vista geográfico, Milgram apenas conseguiu imaginar o Problema do Mundo pequeno, por ter tentado, de forma empírica, verificar a veracidade de TFL, nas redes sociais (Sui, 2004:273).

3.3. A dinâmica das redes: O modelo de Watts e Strogatz e o efeito de vizinhança

A teoria do Mundo pequeno consistiu um avanço importante na ciência das redes, uma vez que permitiu adequar o formalismo matemático da Teoria dos Grafos às redes reais, mais particularmente às redes sociais, cujas ligações estabelecem métricas que permitem classificar a estrutura da própria rede. Estas ligações não-euclidianas, mas de uma métrica derivada das distâncias topológicas, são muito diferentes das dos trabalhos clássicos, essencialmente descritivos, e permitem descobrir padrões que até então estavam encobertos pela complexidade dos fenómenos (Potrykowski e Taylor, 1982:16; Gorman e Kulkarni, 2003:3). A partir dela, vários modelos e métricas foram sendo criados e.g. “blokmmodels, hierarchical clustering, and muldimensional scalling” (Watts, 2004:48), mas todos com um ponto e objectivo comum: fazer o mapa da rede, independentemente, do tipo de rede.

Marc Granovetter, um sociólogo das escolas de Harvard e da MIT, publicou em 1983 um artigo sobre a importância das ligações sociais fracas nas nossas vidas⁶, onde teorizava acerca da relativa maior importância social das relações fracas entre indivíduos (os conhecidos, invés dos amigos) e da influência que têm na evolução e dinâmica das redes. Esta é uma sociedade bastante diferente daquela definida pela teoria Erdős-Rényi.

Segundo Granovetter, um indivíduo possui um conjunto de amigos próximos, isto é, um *cluster* de amigos; por sua vez, esses amigos podem eles próprios terem um outro conjunto de amigos próximos e por sua vez, cada um deles pode ter um outro conjunto, não de amigos, mas de conhecidos, formando um outro tipo de *cluster*, agora de ligações mais fracas do que aquelas exibidas pelos *clusters* de amigos.

Nesta assunção da realidade, a rede social de Granovetter é, aquilo que na Teoria dos Grafos se apelida de grafos completos, ou seja, o *cluster* passa a ser constituído por um grupo de nós (indivíduos) ligados por arcos (revela a força das ligações entre os indivíduos) e em que cada par de nós distintos é adjacente. Formalmente, um grafo completo traduz-se por K_n , em que k significa completo e n , o número de nós do grupo ou *cluster*. (Wilson, 1995:16)

⁶ Granovetter, M. (1983) - The Strength of Weak Ties. A Netowrk Theory Revisited in American Sociological Association, vol. 1:201-233.

Com esta teoria, Granovetter queria dizer que cada *cluster* estava ligado a outro *cluster*, por relações de conhecimento (não de amizade), ou seja, ligações a que chamou de fracas. Nesta perspectiva, e segundo Granovetter, são as ligações fracas as mais importantes numa rede social, na medida em que são elas que permitem a comunicação para fora dos *cluster's* mais densos (onde as ligações são fortes). Sem elas, no limite, estes *cluster's* tenderiam a desaparecer, momento em que passasse a figurar apenas um indivíduo (ausência de rede).

A base empírica que permitiu a Granovetter testar a sua teoria, baseava-se na passagem de um inquérito junto de alguns jovens trabalhadores fazendo-lhes directamente a pergunta: Quem o ajudou a conseguir este emprego? Foi através dum amigo? As respostas, na sua maioria, foram: “No, it was not a friend. It was just an acquaintance.” (Barabási, 2003:41)

Não obstante o facto de a sociedade de Granovetter se tratar de uma rede fragmentada de grafos completos ligados por fracos laços sociais, cujo modelo se provou ser bastante ajustado à sociedade que conhecemos, não permite responder de forma cabal a todas as questões e críticas levantadas à teoria da aleatoriedade de Erdős e Rényi. Nomeadamente, sobre o facto de este modelo poder ser aplicado, não apenas às redes sociais, mas a todo o tipo de redes, assim como da explicação para o facto de terem de existir leis que governem as ligações entre os nós, negando a aleatoriedade.

A resposta para estas, bem como para outras questões ainda não pensadas à altura, surgiram quase trinta anos depois com Duncan Watts⁷, quando numa conversa telefónica com o seu pai, este lhe falou do que era à data um assunto de café: a teoria dos seis graus de separação. O assunto despoletou o interesse de Watts, que decidiu propor ao seu orientador o abandono do projecto em curso, para se dedicar ao estudo das redes sociais. Steve Strogatz, seu orientador, acedeu à proposta sob a condição de essa aventura ser apenas uma paragem no projecto dos grilos, no caso de ao fim do semestre não haver nada de interessante nesse estudo das redes sociais, então deveria parar e voltar ao seu projecto de tese original. Tal não se verificou. Watts e Strogatz acabaram por contribuir para mais uma etapa na evolução da Teoria das redes ao introduzirem uma nova medida topológica: o coeficiente de *clusters* (cf. Tabela 2, em Anexo).

⁷ Jovem matemático a desenvolver a sua tese de doutoramento na Universidade de Cornell em meados da década de 1990, em que investigava sobre a razão dos grilos ‘emitirem sons’ de forma sincronizada.

Apesar do total desconhecimento que alegaram (Watts, 2004:69) acerca das então teorias de Erdős-Rényi, Milgram ou Granovetter, os estudos já realizados sobre o ‘grilar’ sincronizado dos grilos não foi de todo inútil. A questão de partida para o estudo das redes sociais foi o seguinte: como conseguem os sistemas demonstrar coordenação global, quando aparentemente não existe nenhuma força ou autoridade central que os impele? Veja-se precisamente o caso dos grilos; ou ainda, alguns tiques e expressões, que grupos de pessoas, que vivem durante muito tempo em conjunto, adquirem.

Barabási refere-se a este fenómeno como tratando-se duma lei: a lei da auto-organização⁸; algo que tem despertado bastante interesse no seio da Matemática e da Física, na última década do século XX. “Spontaneous and mysterious, synchronized clapping offers a wonderfull example of self-organization...” (2003:45); enquanto Watts prefere falar de dinâmica: dinâmica da rede (que relaciona-se com a criação e a quebra de ligações e suas implicações na estrutura da rede) e dinâmica na rede (acerca do comportamento dos nós e da influência, quer de uns nós noutros, quer na estrutura da rede). “...how coherent global activities emerge from the interactions of peers, without any centralized authority or control? (...) network structure is critical to this question, but so is dynamics.” (Watts, 2004:54)

À questão colocada: Qual a estrutura de uma rede, seja de grilos ou pessoas, em que os indivíduos influenciam-se mutuamente? Já a teoria da aleatoriedade de Erdos-Rényi tinha respondido com o acaso e a probabilidade. No entanto, Ganovetter provou posteriormente que a sociedade não funciona dessa forma. As coisas não acontecem simplesmente por acaso e com probabilidades equitativas, elas são levadas a portarem-se como se parecesse simplesmente casual. Segundo ele, os indivíduos fazem todos parte de *cluster*’s, em que todos interagem com todos.

Tendo por referência uma teoria da conectividade de Anatol Rapoport⁹, da década de 1950, e o modelo de rede aleatória (Watts, 2004:58), como explicação para a evolução das

⁸ A auto-organização é definida como a emergência espontânea de estruturas macroscópicas organizadas em desequilíbrio, devido às interacções colectivas entre um elevado número de objectos microscópicos à medida que reagem e se adaptam ao meio ambiente. A dinâmica de um sistema não pode ser entendida através da decomposição do sistema nas suas partes constituintes. A teoria da auto-organização sugere que interacções locais insignificantes podem, eventualmente, conduzir a uma estrutura global qualitativamente diferente (Rocha; Morgado, 2007, cit. Wu, 1998; Batty, 1995)

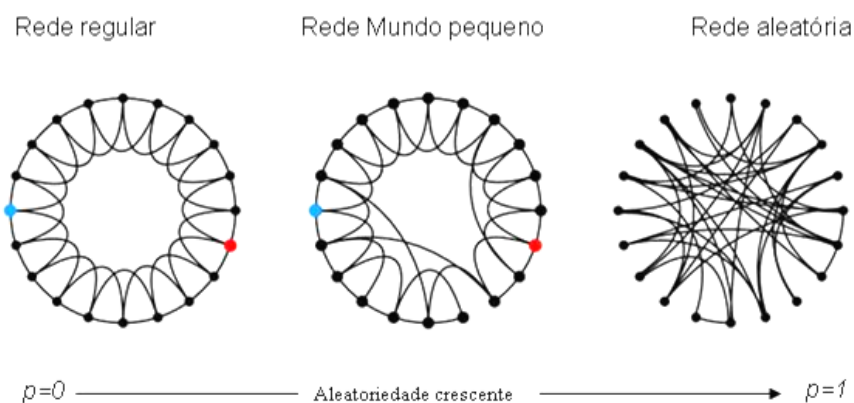
⁹ Matemático da Universidade de Chicago, que durante a década de 1950 fez parte do grupo *Committee on Mathematical Biophysics*, e onde aplicou a teoria das redes e dos grafos, no estudo da dispersão de doenças num determinado contingente populacional. (Watts, 2004:54-61)

redes, Watts e Strogatz desenvolveram a sua própria teoria acerca das redes: O Problema Mundo-pequeno¹⁰.

Publicado na revista *Nature* em 1998; o artigo de Watts e Strogatz tem a originalidade de conseguir conciliar a teoria da aleatoriedade de Erdős-Rényi com a teoria de *cluster's* de Granovetter. O artigo apresenta ainda duas notas de referência (Barabási, 2003:51 e Miceli, 2006): o modelo de *cluster's* da rede, formalizado pelo coeficiente de *cluster's*; e o facto de as redes não serem apenas estruturas de nós e arcos a ligá-los, mas sim estruturas de nós e arcos a ligá-los que evoluem com o tempo, devido à dinâmica dos nós.

A abordagem de Watts e Strogatz consistia no seguinte: Considere-se um modelo em círculo (Figura 14), com n elementos e que cada elemento se relaciona com k outros elementos. Que tipo de grafos se podem obter? Por um lado tem-se um grafo regular em que cada elemento se relaciona apenas com os elementos seus vizinhos. Por outro lado, temos um grafo aleatório, no qual as k ligações do grafo se distribuem aleatoriamente por cada elemento $n-1$, para diferentes valores probabilísticos p .

Figura 14 – Modelo de Watts e Strogatz e o efeito de vizinhança



Adaptado de Watts, 2004

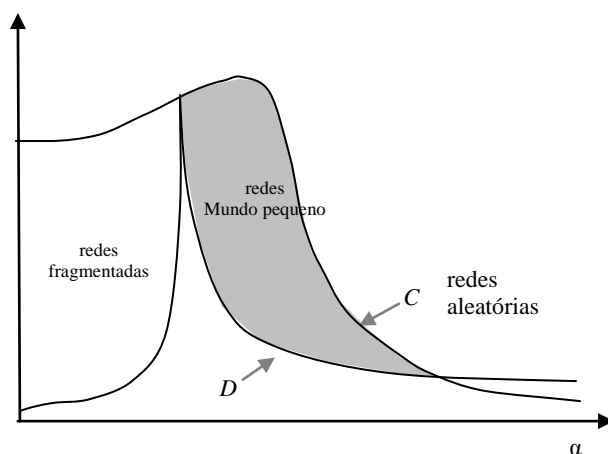
¹⁰ O Problema Mundo pequeno é diferente de Teoria do Mundo pequeno. O primeiro implica duas medidas estatísticas, nomeadamente a distância mais curta e o coeficiente de cluster; o segundo implica somente o conceito de número médio de arcos que intermedeiam qualquer ligação entre quaisquer pares de nós de uma mesma rede.

Segundo o modelo apresentado (cf. Figura 14), e verificando a rede regular com os nós dispostos ao longo do círculo, estabelecem-se relações locais entre cada nó e os nós vizinhos (os dois que o antecedem e os dois que o sucedem sobre o anel). Segundo a rede regular, com probabilidade $p=0$, substitui-se cada uma das ligações locais por ligações aleatórias e então passa-se a ter $p=1$. Pelo meio tem-se ligações locais que são parcialmente substituídas por ligações aleatórias.

Em síntese, tem-se por rede Mundo pequeno, qualquer rede com uma certa ordem escondida entre um estado de aleatoriedade e de regularidade (Jiang, 2006:260), ou seja, que tem a particularidade de terem altos índices de ‘clusterização’, próprio das redes regulares e simultaneamente, distâncias mais-curtas entre os nós da rede, próprio das redes aleatórias. Estas são propriedades que muitas redes espaciais, ou seja, redes com os nós devidamente georreferenciados apresentam, mas que têm sido muito pouco estudados (Xu e Sui, 2007:190; Gorman e Kulkarni, 2003).

Todavia, aquilo que até aqui os autores conseguiram provar foi, que a teoria da aleatoriedade não servia para justificar a estrutura das redes sociais, apesar de as suas intenções serem bem mais ambiciosas. Foi perante tal situação, que Watts e Strogatz propuseram a conciliação entre a sua teoria de *cluster's* e a teoria da aleatoriedade de Erdős-Rényi. Ou seja, se se quiser contactar com alguém conhecido, mas que está do outro lado do mundo, não é preciso de ir de amigo em amigo; bastará apelar a outra rede e estabelecer uma ligação directa com o *cluster* de amigos, que entretanto o nosso amigo foi desenvolvendo. Graficamente, isto traduz-se no traçado de uns quantos arcos aleatoriamente no círculo.

O surpreendente é que esta forma expedita de resolver o problema vai, como é óbvio, diminuir drasticamente a distância topológica (D) entre os indivíduos, mas pouco interfere com o coeficiente de *cluster's* (C), que se mantém quase inalterado (Figura 15), ou seja “Huge networks do not need to be full of random links to display small world features. A few such links will do the job.” (Barabási, 2003:53).

Figura 15 – Comparação entre caminho-mais-curto (D) e Coeficiente de *clustering* (C)


Adaptado de Watts, 2004

Todavia, para que a teoria ganhasse espessura científica entre os pares, os autores decidiram que tinham de formular uma medida quantitativa de análise de redes. Foi criado o coeficiente de *cluster* (C_c)¹¹, medida que serve para determinar se um grafo tem a propriedade de Mundo-pequeno e da coesão ou força das ligações na rede. Para aplicar o C_c tem de se considerar o conceito de vizinhança (V) de um nó n_i , aos nós directamente conectados, de forma que:

$$V_i = \{n_j\} : a_{ij} \in A$$

Em que a corresponde ao arco que liga directamente ao nó e A , o conjunto de arcos do grafo. Sendo que o grau (k_i) de um nó n_i depende do número de arcos que determinam a vizinhança de n_i $|N_i|$.

Assim, o C_c de um nó n_i é proporcional ao número de ligações vizinhas a dividir pelo número de ligações possíveis. Para um grafo não orientado, a_{ij} e a_{ji} são equivalentes, logo o nó n_i tem k_i vizinhos e,

$$\frac{k_i(k_i - 1)}{2}$$

¹¹ Dorogovtsev e Mendes (2003).

são arcos passíveis de existir entre quaisquer dois nós vizinhos. Desta forma, o C_c para um grafo não orientado e não planar pode-se definir formalmente por:

$$C_{c_i} = \frac{2|\{a_{jk}\}|}{k_i(k_i-1)} : n_j, n_k \in V_i, a_{ij} \in A$$

Para intervalo de valores compreendidos entre $\{0, 1\}$, sendo que 1 significa que qualquer nó vizinho n_i está também conectado com qualquer outro nó do grafo; e 0, nos casos em que quaisquer nós n_i não têm vizinhos e consequentemente não se ligam a nenhum outro nó do grafo (Dorogovtsev e Mendes, 2003). O C_c total de um grafo consiste na média dos C_c verificados para cada um dos nós do grafo.

Efectivamente, continuando a tomar por exemplo uma rede social, a probabilidade de dois amigos de um amigo comum se conhecerem tem de ser bastante superior à probabilidade de quaisquer duas pessoas se conhecerem. Na terminologia dos grafos, isto traduz-se em $C_c \leq 0,5$, o que significa que estamos na presença de uma rede em que os indivíduos denotam relações fracas; se, $C_c > 0,5$ ou $C_c = 1$, então significa que a rede evidencia relações fortes.

Todavia, esta fórmula está pensada apenas para grafos não orientados e não planares, ou seja grafos que permitem que os arcos se possam cruzar sem que se tenha de criar mais um nó. Para grafos planares, não orientados, teve de se adaptar a fórmula de acordo com o número de ligações máximas possíveis (cf. Cap. 2), a saber:

Nº máximo (c_{\max}) de ligações possíveis:

$$c_{\max} = 3(N-2), \in N > 2,$$

em que N corresponde ao número de nós do grafo (cf. Cap. 2). Mas como, para além de planar, o grafo também é não orientado, então a fórmula passa a ser:

$$C_{\max} = \frac{3(N-2)}{2}$$

Neste caso, o C_c de um nó n_i , com k_i vizinhos, de um grafo planar expressa-se formalmente por:

$$C_{c_i} = \frac{\sum k_i}{3(k-2)/2}$$

Nota-se que o C_c foi sido criado para analisar e avaliar os nós da rede, e não a estrutura da rede. Contudo, do somatório das ligações entre os vizinhos mais próximos e todos os nós da rede, permite determinar o C_c médio, e assim avaliar do grau de *clusterização* da rede. De salientar, a semelhança entre o C_c e a medida de conectividade índice gama (γ) de Kansky (cf. Cap. 2 e Cap. 6).

Em suma, a revelação científica de Watts e Strogatz do Problema Mundo pequeno baseia-se em duas medidas estatísticas: a média dos caminhos mais-curtos D (índice de Shimble, das medidas de acessibilidade, cf. Cap.2) e o coeficiente de *cluster's* (C_c). O que lhes permitiu concluir, após vários estudos empíricos, que as redes reais não são, nem totalmente regulares, nem totalmente aleatórias. Pelo contrário, elas exibem propriedades de ambas, i.e., simultaneamente muito conexas, mas também com elevada ‘clusterização’ dos seus nós (Xu e Sui, 2007).

Outro grande contributo, da descoberta de Watts e Strogatz, foi o do terem retomado o interesse pelas redes, nos vários domínios científicos, o que levou a um significativo aumento, quer do número de trabalhos e, consequentemente, de artigos publicados, mas também da evolução mais acelerada das teorias, ao que não é também alheio o incremento da computação.

3.4. Os *Hubs* nas redes e o fim do modelo Erdős-Rényi

Por altura da publicação, em 1998, do artigo de Watts e Strogatz acerca da teoria *cluster's*, estava a equipa de investigação de Barabási¹² ocupada a estudar a estrutura das redes complexas, tais como a *world wide web* (*www*), ainda sob orientação do modelo Erdős-Rényi. No entanto, uma vez entendido o alcance da teoria conciliadora do Mundo-pequeno e

¹² Físico, herdeiro da Escola Húngara da Teoria dos grafos e actual director da equipa de investigação da Universidade de Notre Dame, sobre redes complexas. (Watts, 2004:104)

da teoria da aleatoriedade, assim como as implicações que tem sobre a estrutura das redes, convenceram Barabási e sua equipa a re-orientarem a sua investigação.

Todavia, ao confrontarem os primeiros resultados obtidos pelo computador, acerca das suas redes *www* constatam que existem nós que têm bastantes mais ligações que a média verificada para todos os outros nós da rede. Tal resultado suscitou-lhes admiração, na medida em que isto era algo que, quer a teoria da aleatoriedade, quer a teoria de *cluster's* não permitiam. Ao contrário do verificado nas redes aleatórias e nas redes Mundo-pequeno, em que existe uma certa homogeneidade nos graus dos nós, no que respeita à sua conectividade, tal não se constata na Web. Esta descoberta marcou, talvez depois da descoberta de Euler e da Teoria dos Grafos, o maior salto científico no estudo das redes.

Descartados os dois modelos anteriores, por não serem universais, havia agora que encontrar um novo modelo, que fosse capaz de explicar o sucedido e pudesse ser ajustado aos estudos de todo o tipo de redes, e não apenas as sociais, biológicas e tecnológicas. “Hubs (...) again challenge the status quo” (Barabási, 2003:64). Precisamente, quando a equipa de investigação se lançou para o estudo da estrutura da rede *www*, levavam com eles a ideia de que uma página electrónica representava o expoente máximo da democracia; o igualitarismo: toda a informação, acessível a todos.

No entanto, a realidade era bem diferente. Não eram apenas os constrangimentos sociais (o défice de literacia tecnológica, os custos associados aos equipamentos, as assimetrias espaciais da disponibilização das infra-estruturas físicas de acesso à Internet, etc.), mas também os constrangimentos estruturais da própria rede *www*, conforme os primeiros resultados obtidos pela equipa evidenciaram. Existem páginas que têm mais ligações que outras e, por conseguinte, são vistas por mais pessoas. Quanto maior o número de ligações, maior o número de visitas e, consequentemente, maior a visibilidade de uma página.

Segundo os investigadores, a estas páginas (ou indivíduos, ou células, ou empresas, ou cidades, ou quaisquer outros nós, no sentido formal do termo) atribui-se o nome de *hubs* – nós com um número elevado de ligações. Esta é uma propriedade das redes (desde a biologia à economia), complexas e que continua a vigorar, e cujas questões suscitadas relançaram com reforçado vigor o interesse pela Teoria das redes, pelos vários domínios e ramos das ciências, promovendo acima de tudo a interdisciplinariedade (Xu e Sui, 2007). Os *hubs* têm a

propriedade da ubiquidade nas redes.

Mas em que consistia a experiência de Barabási e sua equipa? Tratava-se de verificar, ainda sob a óptica do modelo de Erdos-Rényi, a estrutura da *www*, com base numa experiência feita em 325 000 páginas electrónicas. Os resultados obtidos, levaram não somente ao abandono dos modelos até à data vigentes, mas também a descobrir a existência de *hubs* nas redes¹³, e que são esses poucos *hubs*, que dominam em cerca de 90% a estrutura das redes, iludindo assim os investigadores ao fenómeno do Mundo pequeno. Significa isto, que se retirarmos alguns destes poucos *hubs* da rede, a distância topológica, medida pela métrica do caminho-mais-curto, entre os nós aumenta consideravelmente, o que derrubaria fatalmente a Teoria do Mundo-pequeno.

Em jeito de síntese, pode afirmar-se então que os *hubs* têm a propriedade da ubiquidade nas redes e por conseguinte, a teoria de Erdős-Rényi não é mais válida. Efectivamente, os nós não são todos iguais, assim como também não têm todos o mesmo número de ligações; no entanto, a teoria de *cluster's* de Watts e Strogatz permanece, uma vez que continuam a existir pequenos mundos (*cluster's*) nas redes.

Quanto às questões que as verdades científicas sempre levantam, e são a única forma de se dar continuidade aos estudos e ao processo evolutivo da própria ciência, essas são agora: como se formam os *hubs*? Quantos *hubs* existem por tipo de rede? Como é que os modelos anteriores foram cegos aos *hubs*? Que outras leis universais, para além das já descobertas, podem estar encobertas?

Estas são algumas das questões que têm orientando a investigação acerca das redes nos últimos anos do século XXI e que mais, e mais rapidamente, têm contribuído para o entendimento da complexidade dos sistemas que nos rodeiam, assim como para novas etapas na Teoria das redes.

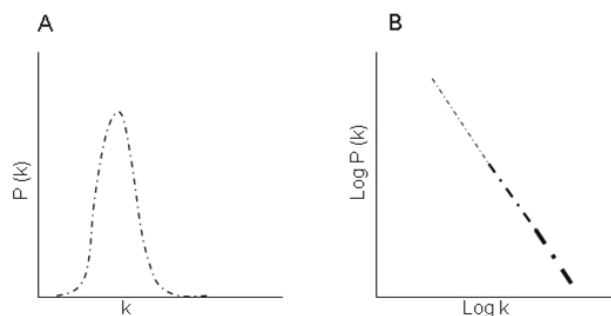
¹³ Alguns dos *hubs* encontrados são-nos sobremaneira conhecidos eg. Altavista.com; Google.com; Yahoo.com; Amazon.com; etc. Sobre alguns destes *hubs*, Barabási escreveu, aludindo à teoria do Mundo pequeno e dos seis graus de separação de Milgram, que “a giant hub, is reachable from most webpages in two or three clicks” (2003:64).

3.5. Redes Sem escala

Alertados pela descoberta da existência de *hubs* nas redes, e pela necessidade de confronto com outros modelos, bem como validação por testes em outras redes, Barabási e a sua equipa, começaram a definir um trilho de investigação que os conduzia a um processo que se estava muito rapidamente a tornar surpreendentemente profícuo em descobertas científicas. Ao terem verificado que - contrariamente ao esperado no início quando se baseavam no modelo de aleatoriedade de Erdős-Rényi e do qual devia resultar uma distribuição dos nós na rede de forma igualitária -, apenas alguns nós da rede *www* detinham a maioria das ligações os investigadores procuraram produzir um gráfico de conectividade dos nós, a fim de avaliar a distribuição das ligações. Para o efeito, e dado o elevado número de ligações da rede *www*, decidiram-se por um gráfico log-log, tendo constatado que a distribuição das ligações respeita o princípio matemático conhecido por Lei de pesos¹⁴, o que implica a existência na rede de muitos nós com poucas ligações em coexistência com poucos nós, mas com muitas ligações.

Tal constatação é ainda mais surpreendente quando se sabe que a maioria dos fenómenos segue uma curva normal (curva em sino), o que é o oposto à distribuição verificada nas quantidades na Lei de pesos (cf. Figura 16).

Figura 16 – Gráfico da distribuição do grau dos nós de um grafo aleatório (A) e de um grafo livre de escala (B)



Adaptado de Barabási, 2003:71

¹⁴ Criada por Vilfredo Pareto (Engenheiro, sociólogo, político e economista), no século XIX, a Lei consistiu em verificar a existência de um rácio omnipresente nos vários subdomínios da Economia. Dos estudos empíricos que levou a cabo, Pareto verificou que existia sempre uma relação de 80/20 (a que chamou de Princípio 80/20), na distribuição da riqueza, ou seja que 80% da riqueza de um País, uma região, ou uma fábrica, residia apenas em 20% da sua população.

No gráfico da esquerda (A), referente a um grafo aleatório, verifica-se que a rede tem uma distribuição normal ou em curva de sino, o que significa que todos os nós têm aproximadamente o mesmo número de arcos a convergirem para si e o número médio (pico da distribuição) dá-nos a ‘escala da rede’. No gráfico log-log da direita (B), verifica-se que a distribuição já não se processa assim. Efectivamente, não faz sentido falar-se de escala da rede ou do grau médio dos nós. Numa rede livre de escala ou sem escala, muitos nós têm poucos arcos a ligá-los ficando a maioria dos arcos que estabelecem as ligações, para uma minoria de nós.

Esta propriedade foi descoberta no estudo sobre a rede *Web*, pela equipa de Barabási, mas a verdade é que, posteriormente, ela tem-se vindo a revelar em outras redes, tais como: redes de ligações aéreas, algumas redes sociais, redes metabólicas, etc. (PRISMA:2008). Neste tipo de redes, alguns nós apresentam-se como *hubs*, regidos pela Lei dos pesos, o que explica a probabilidade $p(k)$ de um nó de um qualquer grafo G se ligar a k outros nós é proporcional a $1/x^2$, em que x corresponde ao número de ligações de um nó. O valor de x será tanto maior quanto menos nós apresentarem x ligações.

Isto significa que os grafos das redes em geral não apresentam uma topologia aleatória e uma estrutura marcada por uma ligação uniforme. Pelo contrário, a curva correspondente ao número de nós em função do número de ligações existentes deixou de se poder representar em forma de sino, para adquirir uma forma em curva, com cauda no final, ou no caso de um gráfico log-log, a forma de uma recta de diagonal invertida (cf. Figura 16).

Após a verificação empírica desta teoria, era preciso a fundamentação científica. Bela Bollbás foi o cientista que provou matematicamente a experiência de Barabási e sua equipa. Considere-se um grafo (G) composto por um conjunto de arcos (A), e um grau de conexão g para cada nó i e j $g(i,j)$, então tem-se que a escala E de G :

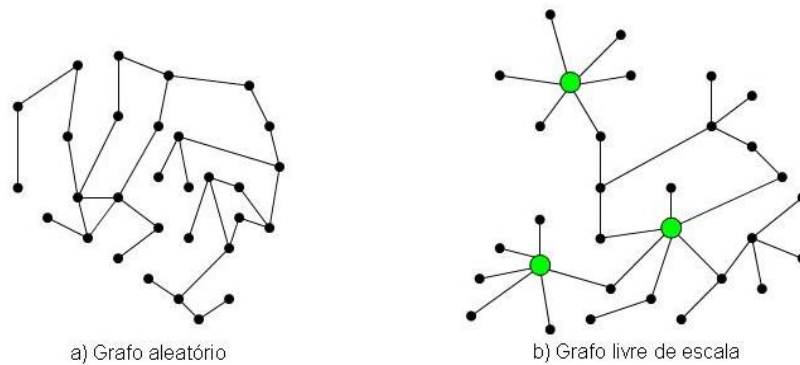
$$E(G) = \sum_{ij \in A} g(j,i) ,$$

para valores máximos em que n $g(i,j)$ ligam com outros n $g(i,j)$ de forma a

$$E(G) = \frac{E(G)}{E_{\max}}, \text{ e}$$

de que resultam valores compreendidos entre $\{0, 1\}$, que permitem classificar o grafo com valores próximos de 1, livre de escala (cf. Figura 17).

Figura 17 – Exemplo de grafo aleatório versus grafo sem escala



Adaptado de PRISMA, 2008

Tal como em outros sistemas regidos pela Lei dos pesos, a característica mais notável num grafo sem escala é o facto de alguns dos nós apresentarem um grau que excede largamente a média, e a que se chamam de *hubs*. Tal lei afecta assim a topologia de um grafo, na medida em que pressupõe a existência de uma hierarquia clássica, em que os *hubs* são precedidos por pequenos *hubs* e assim sucessivamente até aos nós isolados ou com menor grau. Esta é uma característica indicadora de tolerância comportamental de um grafo face a ataques ou falhas. (Xu e Sui, 2005).

Para casos em que os ataques ou falhas ocorram aleatoriamente e os nós tenham maioritariamente graus baixos, então a probabilidade de ser um *hub* afectado é muito reduzida, e consequentemente o grafo não sofrerá grandes alterações. Pelo contrário, se o ataque ou falha for propositado e orientado a um *hub*, então o grafo poderá sofrer graves alterações e no limite desligar-se. Os *hubs* constituem simultaneamente a força e o ponto crítico dos grafos sem escala.

Note-se ainda quanto à distribuição geográfica patenteada pelos grafos sem escala, em

que é típico a colocação do *hub* principal no centro do grafo, com as ligações periféricas a constituírem camadas sucessivas de nós com menores graus, o que origina uma estrutura de grafo com um *core* protegido por várias camadas, de forma a tornar o grafo menos vulnerável ou instável a ataques e falhas (cf. Cap. 6).

3.6. Os ricos ficam mais ricos

Na dinâmica das redes, o mecanismo sugerido por Barabási e sua equipa para as redes sem escala, nas quais estas não são construídas de uma só vez mas que vão surgindo ao longo do tempo, e embora se verifiquem processos aleatórios, são sobretudo as regras que determinam o seu crescimento, mais precisamente à medida que novos nós vão surgindo na rede, estabelecem-se ligações preferenciais entre elas ditadas pelo factor de atractividade que os nós já existentes exercem sobre os outros. Esses nós são aqueles que detêm um maior grau de conectividade. Esta foi a constatação inicial da equipa ao acrescentar à rede *Web* mais páginas electrónicas. Estas criavam ligações preferenciais com as páginas electrónicas que já estavam na rede e que detinham o maior número de ligações, como era o exemplo dos motores de busca Yahoo, Google, Altavista, etc. A esta constatação apelidou-se de ‘os ricos ficam mais ricos’¹⁵, enquanto os pobres iam ficando mais pobres.

No entanto, esta característica acabou por não se revelar universal. Numa experiência em que a equipa fez crescer uma pequena rede adicionando um novo nó com n ligações, por cada unidade de tempo e tomando como hipótese a probabilidade de cada novo nó se ligar aos nós já existentes ser proporcional ao grau desse nó, acabou por verificar que a rede evoluía para uma rede sem escala, com uma distribuição de grau regida pela Lei dos pesos com uma probabilidade $p(k)$ determinada pelo expoente -3, ou -2, seja $p(k) \sim k^{-3}$ ou k^{-2} . Significava isto que havia variações no expoente da distribuição de grau, logo para além do grau de um nó, existe um outro parâmetro na equação que faz determinar a ligação de novos nós na rede. É o parâmetro ‘ajustamento’, que traduz uma certa preferência nas ligações para lá do grau do nó.

Esta propriedade foi evidenciada em várias redes, como por exemplo redes de amigos, redes de cidades, redes de comunidades electrónicas, redes de citações, etc., assim como também em algumas redes estáticas que desenvolvam características sem escala,

¹⁵ Também referido na literatura da especialidade como Efeito Mateus (PRISMA, 2008).

nomeadamente as redes de linhas áreas (Galeana, 2004).

Daqui se conclui que as redes estão efectivamente presentes em tudo. As relações entre as unidades que compõem os sistemas, sejam simples ou complexos – como o são a maioria das redes reais (Barabási, 2003; Dorogovtsev e Mendes, 2003; Watts, 2004; Xu e Sui, 2005; Jiang, 2006) – são um pré-requisito para se compreender e descrever a realidade. É no mapa das relações que os cientistas da actualidade acreditam estar as respostas para alguns dos problemas da sociedade actual, nomeadamente da crise económica, passando pelas epidemias e doenças infecto-contagiosas, da génese e desenvolvimento do sistema de cidades (Batty, 2001).

É com base nas métricas da Teorias do Grafos e das redes, complementadas por metodologias lineares e não-lineares que se fará uso de forma a criar e aplicar um modelo que permita melhor analisar o efeito estruturante das redes de transporte e comunicação no território.

4. Os Sistemas de Informação Geográfica para os Transportes (SIG-T)

O responsável pelo cunho do termo SIG foi Roger Tomlinsom, que no debutar da Nova Geografia, na década de 60 (Claval, 1976:153), ajudou a criar, para o governo Canadano, a *Regional Planning Information System Division*, com o propósito de construir um inventário completo das aptidões do solo no território nacional (projecto *The Canada Land Inventory*). Foi do seio desta divisão, sob a liderança de Roger Tomlinsom (Wright *et al*, 1997:346) que foi constituído o primeiro SIG de dimensão nacional: *The Canadian Geographic Information System* ou *CGIS*; o termo SIG foi difundido à escala mundial. (Foresman, 1998:4; Tomlinson, 1998:21-32; Longley *et al*, 2001:10-12; Machado, 2000:256; Grancho, 2006:27-31).

Apesar de haver um consenso geral em se considerar Tomlinson como o fundador dos SIG (Coppock e Rhind, 1991:28; Foresman, 1998; Longley *et al*, 2001), a origem dos SIG está ligada a uma conjuntura de acontecimentos. Para alguns, os que identificam os computadores como o *backbone* dos SIG, a história pode dividir-se em dois momentos: o antes e o após a introdução dos computadores de forma sistemática nos processos de recolha, armazenamento e manipulação da informação georreferenciada (Machado, 2000:247); para outros, os que encontram as referências consoante as disciplinas e os avanços científicos e tecnológicos, a cronologia dos acontecimentos é avulsa e dispersa, quer disciplinar, quer geograficamente.

Com efeito, anote-se os diversos acontecimentos, as instituições, as organizações e as individualidades que se podem apontar a partir das obras mais referenciadas no que respeita à história dos SIG¹ e dos seus antecedentes²: a Universidade de Harvard e os trabalhos de métodos inovadores dos Arquitectos Paisagistas, com destaque para McHarg³ e a técnica inventada dos *layers cake*; a emergência da Geografia quantitativa⁴ e o início da experiência de um sistema geográfico de informação sueco (Gaspar, 1969); a cartografia automática, da Escola de Washington e Northwestern nas décadas de 50 e 60, polvilhada de geógrafos e investigadores dos transportes (Haggett, 2001:555); e os testemunhos que, ora sublinham a importância da teoria da computação de Alan Turing (o pai da informática e autor da *máquina universal*, 1936) e o aparecimento do primeiro computador, o ENIAC⁵, sem mencionar as virtudes da Detecção Remota (Gaspar, 1969) e do primeiro satélite lançado ao Espaço, o Sputnik em 1957 (cf. Figura 18) (Foresman, 1998:5; Machado, 2000:249; Chrisman, 1998:36)

¹ Foresman, T. (1998). *The History of Geographic Information Systems: perspectives from the pioneers*. Englewood cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Coppock, J.; Rhind, D. (1991). *The History of GIS*. In *Geographic Information Systems: principles and applications*, vol.1, editado por Maguire *et al*, Longman, London. 21-43.

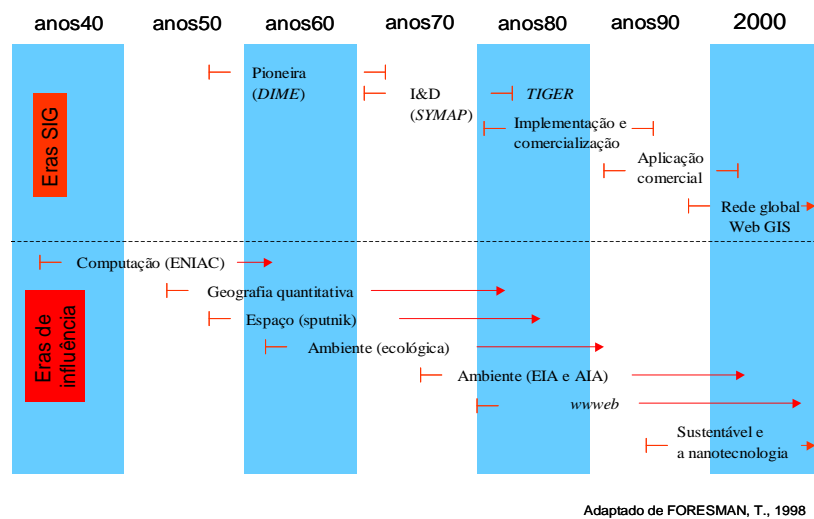
² Hagerstrand, T.; Gaspar, J. (1969). O momento actual da Geografia Humana na Suécia, in FINISTERRA, Vol. IV, nº7. Lisboa. CEG:5-30; Claval, P. (1964). *Essai sur l'évolution de la géographie humaine*. Les Belles Lettres. Paris. 201pp.

³ O seu livro *Design with Nature* (1969), salientava a importância da leitura de mapas em camadas temáticas para o melhor exercício do planeamento

⁴ “Os princípios de análise espacial e de outros procedimentos de tratamento de informação geográfica, bem como algumas aplicações informáticas para os suportarem, foram desenvolvidos, entre outros, pela equipa de William Garrison na Universidade de Washington, em Seattle, no final da década de 50 e início da década de 60.” (Julião, 2001:87). A este propósito, também João Machado salienta o facto de que a maior parte dos SIG apoiados em computadores tenha surgido nos anos 50, muito pela iniciativa da da Universidade de Washington e da intervenção da escola de geografia quantitativa e da engenharia dos transportes. (Machado, 2000:249). Jorge Gaspar faz ressalva da importância que o aparecimento de uma tecnologia moderna de tratamento da informação (data-banks), que conjuntamente com os computadores permitiu, em 1954 iniciar experiências de criação de um sistema geográfico de informação, na Suécia. (Gaspar, 1969:17).

⁵ ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*), composto por 18.000 válvulas de 16 diferentes tipos, 6.000 comutadores, 10.000 condensadores, 1.500 relays, 50.000 resistências, ocupava 3 salas de 70m² e pesava 30 ton. Foi construído em 1946 e esteve inicialmente ao serviço do Exército dos Estados Unidos da América. (Campos, 1992:71)

Figura 18 – Evolução cronológica dos SIG relativamente a outros grandes acontecimentos tecnológicos



Apesar da relação entre as redes de transporte e de comunicação e o território remontar ao tempo dos Romanos, há mais de 2000 mil anos, e de sempre ter sido apontado como um instrumento fundamental para o desenvolvimento e até para a formação de uma Nação (Cortesão, 1964), só a partir do aparecimento dos computadores e da Nova Geografia é que a relação transportes, SIG e território se inicia.

Todavia, esta não foi sempre uma relação estável e sólida. Pelo contrário, sofreu reveses e grandes avanços. Precisamente, se a década de 60 marcou o início da relação dos transportes e os primórdios dos SIG, nas décadas de 70 e 80, a relação foi perdendo fulgor e só mais recentemente, na década de 90 - com uma nova 'revolução' tecnológica e científica, fruto do amadurecimento e consequente reconhecimento da importância dos SIG na Geografia -, essa relação transportes, SIG e território se reatou com maior dinamismo, ao ponto de originar a criação de uma nova ferramenta aplicativa para a modelação de redes de transportes, uma nova área de estudo e ensino, e uma nova comunidade: os SIG-T. (Silva, *et al*, 2003; Miller; Shaw, 2001).

Para esta dissertação e no que respeita à análise histórica dos SIG e dos SIG-T, não se fará aqui mais do que uma breve síntese das suas origens e evolução, sublinhando apenas o que de mais relevante tem ocorrido, no período posterior ao aparecimento e ao uso do computador de uma forma sistemática nos estudos que envolvam informação geográfica. A razão pela qual não se faz aqui um estudo mais aturado e exaustivo sobre a matéria deve-se ao facto de o tema só ser pertinente para esta dissertação enquanto informação complementar e acessória e não enquanto informação estruturante. Crê-se que um trabalho sobre a História dos SIG (onde se inclui os SIG-T) só por si merece uma atenção mais exclusiva e dedicada, quer pela importância que os SIG têm desempenhado a nível científico e tecnológico, quer sobretudo pelo seu impacto na sociedade (Maguire, *et al*, 1991; Wrigth *et al*, 1997:347; Foresman, 1998; Machado, 2000; Goodchild, 2000; Longley *et al*, 2001).

Assim os pontos que compõem este capítulo são: A origem e evolução dos SIG e a emergência dos SIG-T. O que se entende por SIG-T? Quais os modelos SIG-T mais praticados e quais as principais aplicações e tendências dos SIG-T? Neles procurar-se-á responder a questões como: o que significa o termo SIG e SIG-T? De onde emerge a relação entre os SIG, os transportes e território? Que tipo de modelos comporta? Que implicações tem ao nível da investigação e do mercado?

4.1. Origens e evolução dos SIG e a emergência dos SIG-T

Muitos dos trabalhos em SIG antecedem aquilo que Roger Tomlinson designou por SIG, quando criou o *CGIS* para o Ministério da Agricultura do Canadá, para que se realizasse de forma mais precisa, rápida e barata o inventário de aptidões do solo de todo o território. Todavia, é consensual entre os autores da literatura da especialidade, que, na década de 60, os métodos quantitativos da Geografia, e o uso dos computadores estiveram na origem e marcaram o arranque dos SIG (Machado, 2000:256; Goodchild, 2000; Yano, 2001).

A ideia da qual germinou o *CGIS* vai mais além da criação do acrónimo SIG. Quando Roger Tomlinson cunhou o termo, estava longe de imaginar o impacto que este iria trazer, quer para a Geografia, quer para as ciências em geral (Wright *et al*,

1997:346). O que estava originalmente na cabeça de Tomlinson e daqueles que o ajudaram, era sobretudo uma preocupação com a gestão e o tratamento de dados de forma a criarem informação, e a partir dele produzir mais e novo conhecimento sobre o território. Para eles, a solução passava impreterivelmente pelo uso da tecnologia mais avançada, e que à data eram os computadores que tinham substituído os tubos de *vacuum* pelos transístores, e assim ganho mais velocidade de processamento, mais memória e menor custo. O objectivo foi conseguido, independentemente das vicissitudes inerentes a um processo inovador, de cariz multidisciplinar e metodologicamente integrador. Mas o que realmente ficou para a história foi a criação do termo SIG.

Quanto aos acontecimentos que antecederam o *CGIS*, e que constituíram igualmente um marco importante nas fundações dos SIG, destaque-se o *The Atlas to Accompany the Second Report of the Irish Railway Commissioners*, publicado em 1838, e que dava já conta da relação de proximidade entre os transportes e o que viriam a ser os SIG. Anterior ao processamento de informação geográfica de forma analítica (Kao, 1963), ou seja, com auxílio do computador, o documento propunha já uma metodologia que constitui um dos fundamentos dos SIG: a referência espacial (georreferenciação) e a sobreposição de mapas temáticos, mais propriamente os temas da população, do fluxo de tráfego, da topografia e da geologia, com igual escala e limites, de forma a permitir aos técnicos uma melhor leitura da distribuição espacial dos fenómenos e assim elaborar um mais eficiente traçado da rede de transportes.

Contudo, como argumentam alguns autores (Potrykowski e Taylor, 1998:18; Foresman, 1998:3), dificilmente se podem considerar esses trabalhos como do foro da Geografia dos transportes ou tão pouco de SIG-T, tal como se veio a entender. As razões apontadas para esta consideração residem em dois factores: estes eram sobretudo trabalhos de teor descritivo, e o facto de a Geografia dos transportes não ser ainda uma disciplina organizada e autónoma, mas antes uma sub-disciplina da Geografia Económica, que de resto os modelos microeconómicos da década de 20 do século XX deixavam já entender (cf. tabela 1, Cap.2).

Iniciada a era do digital ou era electrónica (Gaspar, 1969), inicia-se também a relação entre os transportes e os SIG, mediada pela Geografia. Precisamente, os geógrafos sempre tiveram como interesse principal o estudo das relações e distribuição espacial dos acontecimentos, o que pressupõe a existência, segundo Berry *et al*, de três ingredientes: informação, ideias e técnicas, sendo que a informação deve sempre preservar as suas coordenadas. (Berry *et al*, 1964).

Segundo Coppock e Rhind, 1991 e Chrisman, 1998, esta relação teve início na Universidade de Washington, na década de 50, quando o geógrafo Garrison e o engenheiro de transportes Horwood esboçaram os primeiros passos nos métodos quantitativos aplicados aos estudos de transportes (Coppock e Rhind, 1991:26). Da relação iniciada, resultou a fusão dos Departamentos de Engenharia Civil e de Planeamento Urbano, que originou a *Urban and Regional Information Systems Association* (URISA), organização que veio amplamente a contribuir para a disciplina de Geografia dos Transportes e constitui uma alavanca determinante para a Geografia quantitativa e os SIG.

Efectivamente, é a partir da URISA de Horwood e Garrison, e outros que se lhes vieram juntar, como Tobler, Berry e Marble, que se estabeleceu uma sólida relação entre a Geografia, os Transportes e os SIG, constituindo os computadores a aliança que garantiu essa relação. Outro exemplo clássico dessa relação, foi o trabalho inovador de Garrison⁶ sobre a influência da rede interestadual Norte Americana de auto-estradas nas mudanças de localização dos centros urbanos, com recurso ao formalismo métrico da Teoria dos Grafos, com chamada de atenção para a importância da variável localização.

Auxiliados pelo uso intensivo do computador, que veio permitir a aplicação do formalismo da Matemática e da Física aos estudos do território, com destaque para os problemas urbanos e dos transportes, o grupo permitiu-se construir uma base de dados e ligá-la ao território, num processo que designaram de geocodificação (Chrisman, 1998:36).

⁶ Garrison, W. (1960) – Connectivity of the Interstate Highway System. Papers and Proceedings of the Regional Science Association, 6:121-137.

Daqui se pode afirmar que a relação entre os SIG e os transportes advém originalmente dos estudos de âmbito da Geografia dos transportes, ou seja, é a partir daí que se podem encontrar os antecedentes dos SIG e dos SIG-T, levada a cabo por geógrafos como Shimbeld, 1953; Ulman, 1957; Garrison e Marble, 1960, 1961; Karsky, 1963; Morrill e Gould, 1963, 1965; Haggett e Chorley, 1967; Wilson, 1969; Taaffe e Gauthier, 1973; entre outros, ou seja muitos dos precursores da Geografia quantitativa e igualmente dos SIG. (Thill, 2000:3)

Com efeito, atribui-se aos trabalhos iniciais de geocodificação (Chrisman, 1998:36) o evento que marcou a origem dos SIG aplicados aos transportes, ainda que indirectamente, já que o propósito era servir o projecto do *US Bureau Census: DIME – Dual Independent Map Encoding System*, para os Censos norte-americanos da década de 70. O processo de base consistia na digitalização (vectorização) da rede de estradas, e na sua transformação num modelo abstracto de arcos e nós (grafo planar) que ajudava na identificação de áreas censitárias e na delimitação de quarteirões, através das relações topológicas das ruas, fundamental para a organização do trabalho de campo. Este projecto foi de resto o precursor do *TIGER (Topological Integrated Geographic Encoding and Referencing)*, da década de 90, uma referência na História dos SIG. (Thill, 2000; Tomlinson, 1998:21-32; Reis, 2000; Spear, 2004:311).

Para o sistema TIGER, embora o procedimento fosse igual, houve um refinamento quanto ao levantamento e armazenamento da informação geográfica, nomeadamente, com a integração adicional de linhas de caminho-de-ferro, da hidrografia, das redes de distribuição de água, dos equipamentos escolares, sociais e de lazer, que de alguma forma ajudassem ao referenciamento censitário. Assim, apesar de não se tratar de um SIG aplicado aos transportes, a verdade é que a necessidade de digitalização (vectorização) da globalidade da rede de estradas e de caminho-de-ferro constituiu um forte impulso aos SIG-T.

Um outro produto dos Censos americanos da década de 90, com igual ou superior impacto, foi o projecto *Census Transportation Planning Package (CTPP)*. O procedimento que consistia na introdução de um inquérito destinado a aferir a mobilidade da população, com questões, entre outras, relativas à origem-destino, entre o local de trabalho e o local de residência, o tempo de viagem, o modo de transporte

utilizado, etc. A informação obtida era depois arquivada e georreferenciada e, mediante um programa SIG próprio, podia ser visualizada e sobre ela realizada inquirições à base de dados e criados alguns mapas temáticos. Esta informação e o programa SIG foram compilados num *cd-rom* e disponibilizados gratuitamente. (Spear, 2004:313).

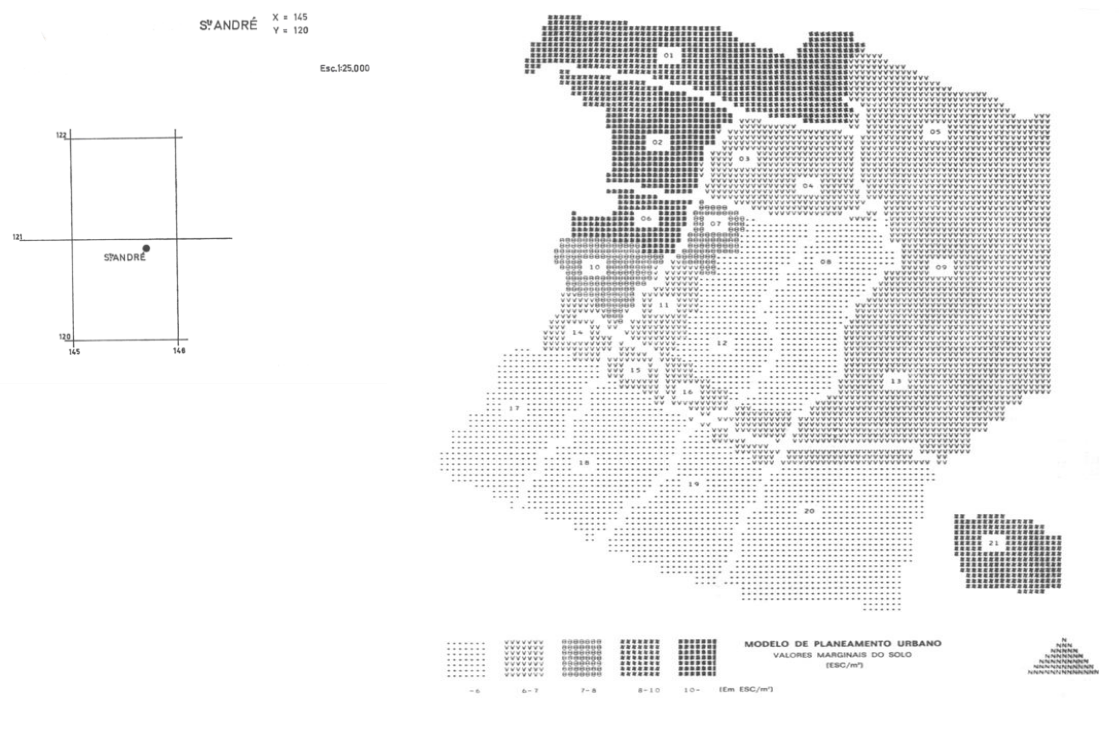
Entretanto, e aparentemente sem qualquer tipo de relação directa, em 1963 Howard Fisher, na Universidade de Harvard, um ano após a sua reforma, consegue obter financiamento para dar continuidade a um projecto que tinha iniciado anos antes no *NorthWestern Technical Institute*, que consistia em manipular dados e análise espacial através do uso dos computadores, mas que não tinha conseguido terminar com resultados substantivos. Com o financiamento obtido, Fisher funda o *Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis*, a partir do qual, juntamente com seus colaboradores, cria um conjunto de programas de computador “...para análise e manipulação de dados por interpolação automática de isolinhas e coropletas” (Machado, 2000:251), que apelidaram de SYMAP (*Synagraphic Mapping System*).

O sucesso do SYMAP pode ser medido pela sua difusão por todo o mundo⁷, servindo o propósito de inúmeras organizações e investigadores, entre os quais, o Gabinete da Área de Sines (GAS), em Portugal, cujos trabalhos constituem umas das referências embrionárias da computação na análise espacial e, conseqüentemente, dos SIG⁸ em Portugal. Tratava-se de elaborar um Plano Geral da Área de Sines para a “zona de actuação directa” (GAS, 1973), o que pressupunha, entre outros procedimentos metodológicos, a criação de um banco de dados referenciado por um sistema de coordenadas militares (Figura 19) devidamente armazenadas em discos e fitas magnéticas, fundamental para o modelo matemático de decisão e para a representação de resultados através da produção automática de cartografia. (GAS, 1973; Machado, 2000:314; Grancho, 2006:84).

⁷ Com mais de 500 instituições a adquirirem o sistema, espalhado por vários países da Europa (inclusive Portugal), Japão, para além da América do Norte. (Machado, 2000:251)

⁸ O Plano de urbanização de Évora e o Atlas do concelho de Loures, são alguns dos projectos que marcaram os antecedentes dos SIG em Portugal, com a coordenação e participação de Jorge Gaspar. (Grancho, 2006:84).

Figura 19 – Métodos de cartografia automática para o Modelo de Planeamento Urbano de Sines.



Fonte: Plano Geral da Área de Sines, 1973

Contudo, para uma melhor e mais extensiva compreensão acerca da importância do *Harvard Lab* de Fisher, não só no que respeita ao desenvolvimento dos SIG, mas também no desenvolvimento científico e tecnológico que o acompanhou, note-se que de entre aqueles que por lá passaram, trabalharam, estudaram e cooperaram, contam-se Sinton, Chrisman, Dangermond, Dutton, Morehouse, Peucker e muitos outros que são referências maiores na História e desenvolvimento dos SIG, assim como dos SIG-T e que contribuíram para revolucionar a forma de investigar e de fazer ciência a partir de dados geográficos.

Numa parceria entre a *Harvard Lab* e o gabinete de Arquitectura Paisagista, liderado por Steinitz e com o apoio fundamental de Sinton, conceberam o primeiro sistema capaz de sobrepor camadas de informação, separadas por diferentes níveis, sob uma estrutura celular, as GRID (*graphic display of rectangular grid information*), a

partir de uma versão inicial do SYMAP. O programa foi largamente utilizado nos estudos e trabalhos dos Arquitectos Paisagistas, tendo continuado a ser alvo de aperfeiçoamentos de acordo com as necessidades dos seus utilizadores, o que fez com que se tenha evoluído para um produto mais robusto, mas também mais interactivo e simpático para o utilizador: o IMGRID (*interactive manipulation GRID*), com uma arquitectura programática orientada para *raster*, e que veio a constituir o ‘esqueleto’ de outros programas comerciais, como o IDRISI⁹, mas também o ODYSSEY¹⁰. (Chrisman, 1998:37).

Todavia, e apesar do sucesso alcançado pelo *Harvard Lab*, a equipa partia-se e dispersava-se. Jack Dangermond, que havia ingressado na Universidade de Harvard, para realizar o seu Mestrado, e aí colaborado e apreendido com a equipa de Fisher, regressou à Califórnia e fundou em 1969, a *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), que foi ao longo dos anos conquistando o mercado e incorporando alguns dos dissidentes do *Harvard Lab*, nomeadamente Scott Morehouse, em 1981. Morehouse, antes de sair para ingressar na ESRI, dirigia o projecto ODYSSEY. Coincidentemente, a ESRI, no ano seguinte (1982), apresenta um novo programa: o Arc/Info 1.0 (programa criado a partir da base conceptual do ODYSSEY) e consegue que este passe a operar em todo o tipo de plataformas, desde os computadores pessoais, passando pelas *workstations* até às grandes *mainframes*. De uma organização sem fins lucrativos de 15 colaboradores, a operar a nível local, a ESRI é actualmente uma empresa com lucros de milhões que estende a sua acção à escala global e conta com mais de 2700 colaboradores (Coppock e Rhind, 1991:32; ESRI, 2009).

Os SIG tornaram-se um caso de sucesso, quer na indústria tecnológica, quer nas ciências que trabalhavam com dados geográficos. Os SIG estavam a adquirir uma escala global e a contaminar vários países e seus respectivos governos, que reconheceram a importância dos computadores e dos SIG, quer para o armazenamento e gestão da informação, quer para o exercício de planeamento e da governação. O parlamento sueco

⁹ IDRISI é um programa criado pela Clark Lab (Laboratório sediado no Dep. De Geografia da Universidade de Clark), com vista ao apoio à decisão em matéria de Ambiente e Gestão sustentável de recursos. É um programa de base *raster*, concebido para análise espacial, classificação e processamento digital de imagem de satélite. Comercializado a partir de 1987, cobre hoje diferentes áreas e domínios sociais, comerciais e governativos em mais de 180 países. (<http://www.clarklabs.org/about/index.cfm>, visitado em Setembro de 2009).

¹⁰ Segundo Chrisman, 1998 o protótipo do SIG Vectorial.

foi um desses exemplos, que na década de 70 aprovou a substituição do sistema manual de registo predial pelo *Swedish Land Databank System* (SLDS). Este reconhecimento por parte do governo sueco é em parte fruto das influências de Torsten Hagerstrand e Waldo Tobler, cuja responsabilidade se fez notar na dinamização da Geografia quantitativa e dos processos de cartografia automática, respectivamente (Hagerstrand e Gaspar, 1969; Coppock e Rhind, 1991). Torsten Hagerstrand foi de resto um dos grandes responsáveis pela modelística em Geografia e o uso de computadores na análise espacial, ingredientes que contribuíram para a referenciação geográfica da informação através de procedimentos automáticos e, consequentemente, dos SIG.

Ainda no panorama Europeu, a Inglaterra só deu os primeiros passos no desenvolvimento dos SIG, por volta da década de 60. Todavia, contrariamente ao verificado nos Estados Unidos da América, o processo não se dá por via da criação de laboratórios e do desenvolvimento de *softwares*, isto apesar do reconhecimento da importância que os computadores e a digitalização da informação acarretavam. Aliás, o desenvolvimento computacional era encarado como um valor acrescentado para o planeamento do território, sendo aplicado em diversas áreas e diferentes agências estatais, como as *National Mapping Agency*, organismos municipais, universidades e politécnicos. No entanto, em Inglaterra, foi um relatório publicado em 1972, numa acção conjunta do governo local e central que despoletou a difusão e o desenvolvimento dos SIG. O relatório intitulava-se *General Information Systems for Planning* (GISP) e determinava a importância do recurso aos SIG por parte das autoridades, no exercício das suas funções na gestão do território.

É ao longo de todo este percurso, desde os antecedentes que constituíram as raízes dos SIG até à actualidade, que a ligação entre os SIG, os transportes e o território se foi construindo e consolidando, de forma mais ou menos vinculada. Existe de facto, uma coincidência temporal entre as origens dos SIG e os SIG-T, por via do formalismo dos métodos aplicados que vieram a constituir a algoritmia que integra alguns dos actuais programas de SIG (cf. Tabela 3).

Todavia, e de uma forma algo paradoxal, deu-se um hiato de mais de 30 anos entre a fase inicial de cooperação da década de 60 e a fase presente de consolidação e desenvolvimento dos SIG nos transportes. A explicação para este período de

afastamento entre os SIG e os transportes deve-se ao percurso evolutivo de cada um. Por um lado, os transportes foram-se distanciando do seu original domínio científico, a Geografia Económica e Regional, e firmando-se cada vez mais como um domínio autónomo, ora no campo da Engenharia, com perda da sua componente espacial, ora preterindo os métodos quantitativos e focando-se numa geografia dos transportes baseada no ‘behaviorismo’¹¹. Por outro lado, os SIG, pelo seu sucesso científico e comercial à escala mundial, passam por um período de permanente revolução científica e tecnológica, mas também por uma crise existencial, fomentada em torno da sua definição.

Como consequência deste percurso diferenciado, e dadas as valências e características entretanto desenvolvidas, a cooperação dos SIG nos estudos dos transportes era mínima, e revelou-se pouco útil. Os transportes tinham perdido o seu pendão espacial e a sua natureza multidisciplinar, algo que só veio a ser retomado nos anos 90, década que marcou a reaproximação dos transportes aos SIG. Segundo Thill, o retomar e o reforço da multidisciplinaridade dos transportes prende-se com quatro aspectos fundamentais que ocorreram nos Estados Unidos:

- *The Clean Amendments;*
- *The Intermodal Surface Transportation Efficiency Act;*
- *The American with Disabilities Act;*
- *The Transportation Equity Act for the 21st century.*

Todos estes documentos legislativos integravam recomendações explícitas para os governos locais e estaduais, para que os transportes passassem a ser abordados de forma interdependente com outros sistemas, e.g., natural, social e económico (Thill, 2000:4).

Foi ao abrigo destas recomendações com teor integracionista e inter-sistémico, que os transportes voltaram a aproximar-se dos SIG, enquanto sistema por excelência, melhor dotado para operar numa ‘economia de escala’ (Goodchild, 2000), para

¹¹ Cf. Bailly, A. (1988) - Geography of transportation: a behavioral approach. La geografia española y mundial en los años ochenta, Universidad Complutense, Madrid: 237-245.

responder às necessidades de armazenamento, manipulação e análise de dados multifonte e multiescala de natureza geográfica. É nesta conjuntura que se afirmam os SIG na resolução de problemas de transportes ou os SIG-T.

Assim, e após as três décadas de afastamento, os transportes e os SIG voltam a convergir e a cooperar. A reaproximação decorre por via do exercício da modelação, para que os modelos de transportes passem a constituir melhores sistemas de apoio à decisão (Fletcher, 1987), com capacidade de gestão de dados geográficos e funcionalidade de análise espacial. O enfoque é sobretudo posto na criação de cenários e na simulação de situações, com o intuito de produzir mecanismos de resposta em tempo-real e sempre com um referencial espacial (Thill, 2000). Em síntese, pode afirmar-se que são três os fundamentos básicos dos SIG, que inicialmente determinaram o interesse dos transportes:

- A capacidade de atribuir um referencial espacial (coordenadas) a qualquer atributo presente na base de dados.
- A possibilidade de efectuar sobreposição de temas;
- A capacidade de anexar vários atributos a qualquer elemento geométrico (ponto, linha e área/polígono);

4.2. O que se entende por SIG e por SIG-T?

Independentemente das revolucionárias capacidades dos SIG para a análise científica a partir de dados espaciais, nomeadamente, o armazenamento, a gestão e a análise de dados, os SIG atravessaram uma crise existencial em torno da sua definição. A razão dessa crise pode ser atribuída a dois factores chave:

- A dificuldade em estabelecer uma definição consensual sobre ‘o que é um SIG’, dada as continuadas evoluções tecnológicas e científicas a nível computacional;
- A dificuldade de aceitação da sua importância científica junto da comunidade académica, com destaque para os geógrafos (Writh *et al*, 1997; Longley *et al*, 2001; Goodchild, 1998; Mark, 2003).

Esclareça-se então, o que se entende por SIG e, conseqüentemente por SIG-T, porque tal como Coppock e Rhind colocam “...the content of any history of GIS depends in large measure on the definition adopted” (Coppock Rhind, 1991:22), o que diz bem da sua importância para a compreensão do processo evolutivo dos SIG

Apesar da sua juventude, e não obstante o crescente fulgor dos SIG, que se afirma como uma indústria na área das ciências aplicadas (Yano, 2001), existe uma crise de identidade junto da comunidade SIG, que é simultaneamente causa e consequência da incapacidade de produção de uma definição clara e consensual.

O pluralismo que caracteriza os SIG, no que respeita às origens, áreas de aplicação e disciplinas envolvidas na sua concepção, constituem simultaneamente a sua riqueza e fraqueza conceptual. As múltiplas definições, dispersas por livros, relatórios, artigos, teses, crónicas de jornais e revistas, etc., reflectem bem o ‘ruído’ que existe em torno do conceito, e a dificuldade em estabelecer-se um consenso acerca de uma definição, que uniformize e permaneça (Maguire, 1991:9). As definições de SIG têm-se alterado constantemente de acordo com a evolução dos próprios SIG e por isso, hoje, podem encontrar-se variadas definições distribuídas pela extensa literatura da especialidade (Simões, 2006).

Tal como a dualidade existente quanto ao período que marca a origem dos SIG (antes ou após do aparecimento dos computadores), também no que respeita às tentativas de estabelecer uma definição de SIG existe um conflito entre aqueles para quem a tecnologia (o *hardware* e o *software*) constitui a componente essencial, e aqueles que consideram o processamento da informação e as aplicações SIG, a fonte de vida dos SIG (Maguire, 1991:10; Malczweski, 1999:16). Apenas para ilustrar esse ‘ruído’, atente-se a algumas definições de SIG avançadas por organismos estatais, desde a sua existência:

- A definição inglesa, que figura no relatório do Comité Britânico sobre o tratamento de informação geográfica (Comité presidido por Lord Chorley em 1987), é a seguinte:

“A system for capturing, storing, checking, integrating, manipulating, analysing and displaying data which one spatially referenced to the Earth. This is normally considered to involve a spatially referenced computer database and appropriate applications software” (Stefanovic et al, 1989: 452).

- A definição americana, com origem no Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography (FICCDC, 1988):

“System of computer hardware, software and produces designed to support the capture, management, manipulation, analysing, modelling and display of spatially referenced data for solving complex planning and management problems.”.

- A definição francesa, proposta pela *Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection* (S.F.P.T.), em 1989, é a seguinte:

“Système informatique permettant, à partir de divers sources, de rassembler et organiser, de gérer, d’analyser et de combiner, d’élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l’espace.”.

- A definição portuguesa, que parte do Centro Nacional de Informação Geográfica (CNIG), presidido pelo Engº Rui Gonçalves Henriques:

Em sentido lato: *“Um SIG é um conjunto de procedimentos concebidos com o objectivo de armazenar, aceder e manipular informação georreferenciada.”.*

Em sentido restrito: *“Um SIG é um conjunto de programas residentes num computador, que permite introduzir, aceder, manipular e visualizar informação georreferenciada.”.* (CNIG, 1990).

Do ponto de vista não-institucional, a profusão de definições é ainda mais extensa, muito embora pelo seu carácter não formal devam ser tidas em conta com maior precaução e até com algum cepticismo. Contudo, dependendo da fonte, a

credibilidade de algumas são irrefutáveis e merecem ser consideradas na mesma medida que as definições institucionais. Face ao exposto, apontem-se as definições assinadas por aqueles que estiveram nos movimentos embrionários dos SIG e que têm dedicado as suas vidas profissionais ao seu estudo, eg. Michael Goodchild, Jack Dangermond, Richard Tomlinson, Nicholas Chrisman, David Maguire, Stan Aronoff, entre outros.

- “Geographic Information Systems are integrated computer systems for the input, storage, analysis and output of spatially referenced data” (Goodchild, 1998:560)
- “Um SIG, no seu sentido mais amplo, é um conjunto de procedimentos manuais ou executados por um computador e que serve para armazenar e manipular dados georreferenciados” (Aronoff, 1989:39)
- “GIS are systems which deal with geographical information” (Maguire, 1991:11)
- “GIS is a computer-based information system that enables capture, modeling, manipulation, retrieval, analysis and presentation of geographically referenced data” (Worboys, 1995)
- “GIS – organized activity by which people measure and represent geographic phenomena then transform these representations into other forms while interacting with social structures.” (Chrisman, 1999)

Outros, por uma questão de perfil de utilização e área de formação, ou simplesmente numa tentativa de forjar um novo acrónimo e assim ganhar o estatuto de ‘Pai’ dos SIG, alteraram a composição do termo, a saber: *Land Information System* (LIS), *Urban Information System* (URIS), *Environment Information System* (ERIS) e *Cadastral Information System* (CAIS), como alguns dos termos mais referenciados na bibliografia e cujo impacto obtido foi pouco mais do que o de contribuir para a dificuldade no estabelecimento de uma definição universalmente aceite e estabilizada. (Julião *et al*, 1998).

Todas elas têm como denominador comum o facto de um SIG ser um sistema. Um sistema composto por um conjunto de técnicas, de métodos, de *hardware* e *software* que incorporam a estruturação, o armazenamento e o manuseamento e gestão digital de informação geográfica referente e referenciada (informação georreferenciada), no mínimo, a um ponto, a uma linha, a uma superfície ou a um volume.

Neste contexto, um sistema é um conjunto de elementos e de actividades ligadas entre si para atingir um objectivo comum: armazenar, tratar e gerir informação geográfica. Um sistema de informação agrupa um conjunto de processos que asseguram a recolha, a codificação, o armazenamento, a análise e a representação dos resultados.

Sintetizando, um SIG poderá ser entendido como um conjunto de *hardware*, de *software*, de métodos e de dados que permitem a uma pessoa (indivíduo ou instituição) a gestão dessa mesma informação de base geográfica.

Actualmente, e pelas diversas aplicações que os SIG têm conhecido (ambiente, planeamento, economia regional, telecomunicações, redes, estatísticas, análise sociológica, ecologia e urbanismo - a retoma dos modelos da escola de Chicago -, arquitectura, arqueologia, biologia marinha, agricultura, etc.), eles são mais do que o simples acrónimo: os SIG são uma disciplina (Machado, 2000:222) que incorpora o conhecimento de muitos domínios científicos e a conjugação de diferentes tecnologias, contribuindo para o avanço nesses domínios científicos, testando e optimizando algoritmos, relacionando e combinando diferentes métodos (Painho, 2005).

Efectivamente, apesar da sua juventude, os SIG têm a particularidade de conseguirem pôr em discussão individualidades e organizações, da comunidade científica, técnica e até política, sobre se são uma mera ferramenta de análise de dados, uma tecnologia inteligente ou uma ciência (*“Geographical Information Science or GISc”*), tal como se lhe referiu pela primeira vez Goodchild, num artigo para o *International Journal of Geographical Information Systems*. (Goodchild, 1992; Wrigth *et al*, 1997; Thill, 2000:3; Mark, 2003).

Sobre SIG e CIG (Ciência da Informação Geográfica), desde então muita discussão tem existido e pouco consenso tem havido¹². Segundo Fotheringham e Longley, grande parte da dificuldade em reconhecer a dimensão extra-ferramenta, e a importância real que os SIG desempenham na investigação e no apoio à decisão em planeamento, deve-se à sua má utilização, fruto da acção irresponsável de alguns utilizadores e especialistas, que fazem questão de lhe conferir um aspecto extra complexo, pejado de dificuldades e apenas acessível a técnicos sobredotados, ou seja apenas com o intuito de conferir um ‘aspecto’ mais sofisticado a projectos que são, quer cientificamente, quer na análise espacial, fracos e desinteressantes (Fotheringham, 2000; Longley, 2000).

É neste quadro situacional que a CIG tem um papel a desenvolver, uma vez que existe “something special about spatial” (Longley *et al*, 2001) e que os SIG podem ser acessíveis a todos e servir múltiplas aplicações, sempre que o manuseamento de informação espacial seja necessário.

Entre os vários domínios científicos e áreas de investigação em que os SIG têm sido aplicados e constituído matéria de análise, destacam-se os transportes. Os SIG, com aplicações exclusivamente desenvolvidas para a resolução de problemas espaciais, ligados ao sector dos transportes constituem um sub-domínio dos SIG que mais se tem desenvolvido na última década (Miller e Shaw, 2001), e que é uma consequência natural de três factores:

- A necessidade de dar uma resposta fiável aos problemas reais que se foram colocando, nomeadamente, a necessidade dos estudos de transportes em integrar mais informação, e.g., ambiental, urbanística, uso do solo, social, económica, demográfica, política, etc., do que aquela que usualmente eram tidos em conta quando os estudos tinham um cariz predominantemente de engenharia, e sobretudo a adopção de uma componente espacial na informação de base;

¹² Esta discussão levou mesmo ao aparecimento de um movimento iniciado na década de 90, designado de *Critical GIS*, em que o termo *critical* foi adaptado da teoria crítica desenvolvida pelos teóricos sociais da Escola de Frankfurt, eg. Theodor Adorno e Jurgen Habermas. In Encyclopedia of Geographic Information Science; Karen Keny (editor); SAGE reference online, consultado em Setembro de 2009. url: <http://sagereference.com/geoinfoscience/Article:n29.html?searchQuery=y%3D14%26quickSearch%3DGI%26x%3D47>

- O facto de os pioneiros dos SIG terem sido os investigadores dos transportes, que acabaram por fundar a Escola de Estudos Regionais e Urbanos em Geografia (a URISA de Garrison e Horwood);
- A tecnologia, que foi proporcionada pelo desenvolvimento dos SIG, também possibilitou o desenvolvimento dos SIG-T, com destaque para o desenvolvimento ao nível dos SGBD e também da criação de programas *stand-alone*, para a realização de tarefas orientadas para a resolução de problemas específicos (Waters, 1999:828).

Contudo, e apesar do entendimento geral de que os SIG constituem uma ferramenta-chave no desenvolvimento dos estudos dos transportes e, consequentemente, na resolução de problemas ligados aos transportes, conforme se pode testemunhar das palavras de Black, “Very few contributions to transportation geography during the 20th century can match the importance of the development of geographic information systems devoted to transportation (GIS-T)” (Black, 2003:275), existem algumas vozes, que embora não pondo em causa a importância dos SIG nos transportes, discordam do facto de os SIG-T serem ‘apenas’ um sub-domínio dos SIG.

Segundo Thill e Fletcher, os SIG-T, quer pelo facto de os SIG convencionais não darem uma resposta cabal às necessidades dos estudos em transportes, quer pelos modelos de análise e gestão de dados específicos dos estudos de transportes, (Goodchild, 1998; Fletcher, 2000), mas também porque o seu sucesso e crescente procura (Waters, 1999) abriram lugar a um nicho de mercado e de investigação que alguns começam a reclamar (Thill, 2000; Gupta, 2003), são uma disciplina autónoma, ou então um subdomínio das CIG. As CIG-T (Ciências da Informação Geográfica para Transportes), conforme dizem Miller e Shaw são “...a subset of GISc¹³ that develops theory and method for capturing, processing, analyzing and communicating digital transportation information” (Miller e Shaw, 2001:6).

A este respeito, também Fisher acentua o estímulo que a relação transportes e SIG e CIG concede para aqueles que constroem os modelos, afirmando que os SIG-T são uma aplicação dos sistemas e das ciências de informação geográfica para a

¹³ Acrónimo para *Geographic Information Science*.

resolução de problemas dos transportes, com maior importância actual no universo das tecnologias de informação geográfica (Fisher, 2003).

Ainda segundo Miller, os transportes beneficiaram muito dos SIG, nas suas componentes Sistema de Gestão de Base de Dados Espaciais (SGBDE) e de Sistema de Suporte à Decisão (SSD), mas pouco da sua componente de Análise Espacial, quando é desta que os modelos de transporte poderão retirar maior proveito, quer ao nível do planeamento, quer ao nível teórico e do conhecimento. Esta convergência, transportes, SIG e análise espacial ocorreu nos finais da década de 90, por acção de “new geocomputational tools that are emerging from geographic information science (GISc), a new interdisciplinary field that focuses on the theory and techniques behind GIS and related Technologies” (Miller, 1999:2), mas está ainda por desenvolver a total amplitude das funcionalidades que daí se podem retirar.

Está-se assim perante a designada 2ª geração SIG-T, que vem destituir algumas das aplicações iniciais da década de 70, eg. *Geodata Analysis and Display System* (GADS)¹⁴, ou o caso daquela que foi uma iniciativa do governo sueco, na criação de uma base de dados rodoviária para alimentar um plano de transportes, muito rudimentares no que concerne às funcionalidades espaciais dos SIG actuais (Waters, 1999:828; Miller, 1999), negligenciando por completo a análise espacial, à semelhança do que foram os projectos antecedentes, como o DIME e mais tarde o TIGER, que privilegiavam o armazenamento e a gestão de dados, ou seja as funções de SGBD.

Actualmente, com a forte aposta no desenvolvimento de algoritmia específica para análise espacial aplicada à resolução de problemas de transportes, a 2ª geração SIG-T utiliza metodologias próprias e modelos de análise que não se encontram nos programas SIG convencionais, facto que lhes confere um distanciamento conceptual com os SIG, e um reforço da autonomia no âmbito da CIG (Fletcher, 2000; Miller, 1999).

¹⁴ GADS foi uma aplicação desenvolvida pela IBM, em meados da década de 70, especificamente para resolver problemas de policiamento e definição dos perímetros das escolas.

Este processo de maturação dos SIG-T para a CIG-T, aliado à sua natureza interdisciplinar conduz – tal como sucede nos SIG e CIG – a algum ‘ruído’ e consequente proliferação de definições avulsas e opiniões divergentes (Fletcher, 2000; Miller e Shaw, 2001; Gupta *et al*, 2003; Black, 2003).

Note-se ainda, a importância que tem a relação entre os SIG e os Transportes nos estudos e na investigação para o sector, podendo-se encontrar vários testemunhos a partir dos conceitos de sistema, de interdependência e de localização fundamentais na análise espacial, que Tobler sintetizou naquela que é a Primeira Lei da Geografia: “everything is related to everything else, but near things are more related than distant things.” (Tobler, 1970:236). Daqui se explicam as relações espaciais inter e intra-fenómenos, cujos resultados se manifestam ao nível da dependência e da heterogeneidade espacial, bem como da resiliência e ou influência entre sistemas.

Em suma, os SIG-T são os SIG aplicados a problemas específicos dos transportes. Sendo que, segundo Shaw e Rodrigue, são três os tópicos específicos dos transportes que ocupam presentemente os estudos em SIG-T:

- Representação e visualização de informação - como podem vários componentes e temas serem representados e vistos num ambiente SIG-T?;
- Análise espacial e modelação - que tipo de metodologias, e como podem ser usadas em SIG-T? e
- Aplicações - que tipo de aplicações são ajustadas para os SIG-T? (Shaw e Rodrigue, 2009), ou por outras palavras, como podem os SIG ser adaptados em prol do desenvolvimento dos transportes. Uma das formas encontradas é a modelação.

Precisamente, com a computação a potenciar cada vez mais as funcionalidades que os SIG vêm congregando e disponibilizando, as aplicações destes aos transportes estendem-se para lá do princípio básico da sobreposição e inquirição, para se focarem na modelação, na criação de cenários e nas simulações, com o intuito de constituírem melhores sistemas de apoio à decisão (Fletcher, 2000).

4.3. Modelos SIG-T

A modelação é um exercício relativamente recente na política de transportes. A sua génese deve-se à necessidade de planeamento. Precisamente, a política que sempre foi um acto isolado e auto-gerido pelos políticos, só na pós-revolução industrial, por finais do século XIX, dada a necessidade de se deslocarem pessoas e bens (factor determinante na economia regional), é que permitiu e incentivou os primeiros trabalhos de planeamento em transportes, e com estes a modelação, como forma de representar e analisar o sistema de transportes.

Outro momento determinante no planeamento de transportes foi o aparecimento do automóvel. O impacto que o carro teve nos transportes, nos anos a seguir à primeira GG, fez-se sentir também a nível territorial e social (Ascher, 2001:12) o que despertou o interesse, não só dos políticos, mas também de académicos e técnicos. Os primeiros estudos sobre sistemas de transportes e os impactos que produzem no território têm lugar no início da década de 20; destacam-se por serem não somente descritivos e qualitativos, mas sobretudo quantitativos e analíticos e cujos fundamentos continuam a serem válidos e adaptáveis (Lay, 2005:166). Eram os primeiros modelos em transportes, ainda que tivessem uma base econométrica (cf. tabela 1).

Com efeito, a modelação em transportes é uma consequência da necessidade de planear o sistema de transportes, sendo que este deve ser um exercício integrador e holístico, pelas implicações que tem sobre outros sistemas e sub-sistemas, e.g., económico, urbano e regional, social, ambiental, etc. Contudo, os modelos em transportes nem sempre tiveram a capacidade de integrar este volume de dados multi-fonte e produzir análises multi-escala. Só com o aparecimento do computador, na década de 50, e o desenvolvimento tecnológico, é que foi possível constituir a modelação como uma componente do planeamento, conforme Richardson expõe: “With the advent of computers (...) it was realised that it was possible to process significant amounts of data, thus enabling quantitatively oriented planners to analyse traffic movement patterns in a systematic manner. The mathematical modeling of the transport system thus became an important feature of transport planning.” (Richardson, 1990)¹⁵.

¹⁵ Richardson, A. (1999 – Transport planning and modeling – A twenty year perspective. Australian road research, 20:9-21. Artigo citado por Lay, 2005:167.

No que respeita aos modelos SIG-T, a diferença quanto à sua génese e evolução difere apenas pela integração da componente SIG. Precisamente, é por via da ciência computacional e do uso dos métodos analíticos dos SIG, que a relação entre a Geografia e os Transportes se volta a intensificar após o primeiro terço do século XX. Todavia, o reatamento desta relação não foi de um pleno entendimento, fruto das quase três décadas de caminhos separados. Os modelos de transportes que se foram concebendo assentam em algoritmia que ainda não foi totalmente integrada pelos programas SIG convencionais, assim como o oposto (os programas de transporte não têm conseguido aproveitar todas as capacidades de análise espacial dos SIG) também é verdade.

Os modelos SIG-T existentes mais não são do que modelos de transportes que passaram a adoptar algumas funcionalidades dos SIG, nomeadamente, a georreferenciação, a ligação entre uma base de dados alfanumérica e a representação gráfica, assim como a capacidade de sobreposição de temas, de que resulta a possibilidade de efectuar algumas operações de análise espacial. Resumindo, os modelos SIG-T são modelos de transportes com funções SIG, ou seja, em rigor, são modelos T-SIG (modelos de transportes com funções SIG), dado que a base algorítmica do modelo e a sua orientação sistémica, são os transportes.

Dos vários modelos identificados de SIG-T é possível agrupá-los de acordo com a faculdade que possibilitam aos analistas, em transformar um modelo do tipo vectorial, composto por linhas e pontos, num modelo topológico formado por arcos e nós, e a partir dos quais é possível aplicar algoritmia desenvolvida para análise topológica, especificamente, para verificar e caracterizar as propriedades da rede.

Assim, tal como não existe um SIG específico para todas as possíveis aplicações, também não existe um SIG específico que congregue todos os modelos de transportes existentes. O que se tem vindo a verificar é uma tentativa de concatenar as funcionalidades de análise espacial em SIG com a algoritmia específica dos modelos de transportes. A forma como se tem vindo a processar esta iniciativa é analisada em pormenor no ponto seguinte.

4.4. Principais Aplicações e tendências dos SIG-T

Na relação SIG-Transportes, e de acordo com uma visão mais generalista e conceptual, segundo Miller aquilo que os investigadores de transportes devem inicialmente entender é que os SIG podem ser tidos numa dupla perspectiva: enquanto Sistemas de Gestão de Bases de Dados (SGBD), cruciais no armazenamento, gestão e manuseamento de informação georreferenciada e enquanto Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), com funcionalidades destinadas à comunicação de resultados, obtidos a partir dos métodos de análise espacial, por meio do mapeamento e da criação automática de relatórios, para diferentes tipos de clientes, e para diferentes temáticas, nomeadamente, os transportes (1992:2 cit. Miller; Storm, 1996)

Reconhecido o mérito dos SIG e a importância da análise espacial para os modelos de transporte, há que criar condições para que os utilizadores, com destaque para aqueles que têm de decidir em função dos transportes, possam passar a dispor do melhor dos dois mundos, ou seja, de modelos de transporte específicos e das funções de análise espacial avançada dos SIG, face à riqueza dos dados existentes (atributos das redes).

Para atingir esse objectivo, os investigadores de transportes têm oscilado metodologicamente entre as seguintes opções:

- Programam para introduzir algoritmia de métodos de análise espacial, retirados dos SIG, em programas específicos para modelação de transportes (neste caso é mais uma situação de T-SIG, do que o contrário);
- Programam para introduzir algoritmia referente às funções que decorrem de algumas fases sequenciais dos modelos de transportes em programas SIG, ou;
- Concebem de raiz um programa que compile os métodos de análise espacial que o modelo sequencial de transporte necessite, com um único interface gráfico e autonomia processual. Trata-se de uma opção de programa *stand-alone*, que deve contudo garantir a integridade dos dados na migração entre programas, quer de SIG, quer de transportes.

Recentemente, com a maior capacidade tecnológica de que se dispõe, para ajudar a compreender e a medir a complexidade que caracterizam o sistema de transportes e a relação que estabelecem com outros sistemas (uso do solo, sociais, demográficos, económicos, ambientais, etc.), os analistas espaciais, com destaque para os geógrafos, têm reforçado e alargado a sua área de auxílio científico, socorrendo-se de teorias, métodos e técnicas de outras ciências, geográficas e não só, e.g., a Estatística, a Detecção Remota, a Geodesia, a Matemática, a Física, a Ecologia, a Biologia, a Sociologia, a Computação, etc., para potenciar a sua capacidade analítica de dados (p.ex. *Data minning*¹⁶, autómatos celulares, redes neuronais artificiais e redes complexas, agentes e multi-agentes).

A este propósito, Miller classifica a situação como uma oportunidade para ultrapassar alguns das condicionantes que os geógrafos que se dedicam ao estudos dos transportes têm vindo a denunciar, nomeadamente, no que respeita ao volume de informação, à análise probabilística capaz de incorporar a incerteza e ao tempo disponível para obtenção de resultados (1999:20). Fisher, de forma assertiva, refere-se a este período como um avanço na análise espacial, libertando-a de assumpções e axiomas que eram um entrave ao desenvolvimento analítico, e que classifica de “Computational intelligent (CI) methods that can exploit the increasing power of computing platforms to explore data and mathematical spaces with a minimum of *a priori* assumptions” (1997; cit. Miller, 1999:20).

Uma vez mais, são os SIG e a CIG que melhor podem tornar esta metodologia possível mediante a disponibilização de um conjunto de métodos necessários à experimentação, visualização e análise em tempo útil e, de forma a poder dar uma resposta cada vez mais cabal na resolução de problemas espaciais, na medida em que conseguem lidar com a imprecisão e a incerteza, e serem simultaneamente preditivos, através da criação de cenários possíveis e de simulações.

¹⁶ O termo derivou do mundo empresarial, o qual tem sido o principal responsável pela aplicação e desenvolvimento da área de investigação que se tornou e que tem mais recentemente vindo a difundir-se por diferentes domínios do conhecimento. Segundo Bação, na génese e desenvolvimento do *Data minning* podemos encontrar “a Estatística, a inteligência artificial/reconhecimento de padrões, a ciência computacional (Bases de Dados), a optimização e o marketing, ...” (2006). O termo é também, sobretudo no meio académico, conhecido por ‘Descoberta de conhecimento’, uma vez que explicita o que as ferramentas inerentes proporcionam: extrair informação escondida e encontrar padrões preditivos de volumosas bases de dados.

A forma como se processam estes avanços nos SIG e nas CIG, quanto à integração de algoritmia específica para a criação de modelos que constituam um apoio à resolução de problemas espaciais específicos, podem categorizar-se em três níveis diferentes, de acordo com o mercado:

Nível 1 – Oportunistas: normalmente são as grandes empresas de programas SIG que, em acordo com determinadas universidades fazem rastreio e captação de técnicos (cientistas e investigadores) e potenciais projectos que possam vir a tornar-se comerciais e concorrentes;

Nível 2 – Pioneiros: são os *free lancers*. Aqueles que não aliciados pelas grandes empresas ou que lhes escaparam, desenvolvem e disponibilizam um programa próprio.

Nível 3 – Utilizadores de rotina: todos aqueles que adoptam um programa já testado e com provas dadas na resolução de uma tipologia de problemas. Contribuem para o avanço nos programas enquanto clientes de versões Beta e clientes exigentes.

De acordo com Miller e Shaw, a Teoria dos Grafos é a base matemática para representar e modelar redes, e um método especialmente vocacionado para aplicações SIG e Transportes, segundo o modelo arco/nó (Miller e Shaw, 2001:458). Na realidade, são já muitas as aplicações que os SIG-T disponibilizam, que vão desde o trivial armazenamento e gestão de informação georreferenciada das redes de transportes, até aos modelos gravíticos, de gestão de tráfego e gestão de frota, ao associarem as funcionalidades SIG com a Detecção Remota, na aquisição de informação de grandes superfícies e com grande detalhe. “These GIS-T packages are capable of undertaking statistical analysis, including descriptive statistics and regression analysis. There is virtually no limit to what can be done with some of the software.” (Black, 2003:278).

No entanto, este testemunho ‘romântico’ de Black não colhe consenso entre os profissionais da área, conforme se pode aferir através de uma abordagem e leitura acerca das funcionalidades de alguns dos mais comerciais programas SIG-T disponíveis no mercado. Para uma maior adequação dos métodos de análise espacial dos SIG aos modelos de transportes, um dos caminhos percorridos por alguns dos investigadores dos transportes, tem sido o da criação de um programa específico de análise de transportes,

com algumas aplicações SIG.

Nesta perspectiva, mais do que a existência de alguns programas comerciais de SIG-T, o que se verifica é a existência de programas T-SIG, ou seja, programas de base dos modelos de transporte, que foram adoptar algumas das funcionalidades de análise espacial providenciadas pelos programas SIG. Apesar do sucesso comercial (a oferta condiciona a procura), a tarefa não tem sido totalmente bem sucedida, quer devido à incúria dos programadores, quer devido ao fraco apelo do mercado.

Como resultado tem-se a inexistência de um produto para os utilizadores de rotina, já devidamente experimentado, testado e que satisfaça as necessidades generalistas dos que trabalham com redes de transportes e comunicação e com métodos provenientes da Teoria dos Grafos e das redes complexas, combinada com algoritmia de análise espacial. A este propósito, não apenas geógrafos (Batty, 2003:3), mas também investigadores de outras áreas, como a Física, reparam que “We have not yet touched upon a factor which can seriously influence the structure of many networks: the geographic locations of vertices.” (Dorogovtsev e Mendes, 2003:51).

Para uma noção mais prática e real acerca das aplicações SIG-T que os programas comerciais¹⁷ do mercado disponibilizam, optou-se por fazer combinar algum conhecimento empírico com um pequeno trabalho de campo, marcado por algumas entrevistas a técnicos especialistas de algumas empresas nacionais a prestarem serviço na área dos transportes, e que operam com os mencionados programas SIG-T. Destas entrevistas duas notas de registo fazem a síntese das várias impressões obtidas:

- Os programas SIG-T no mercado não são auto-suficientes para dar resposta a questões que obriguem a uma análise relacional de transportes e do espaço. É frequente o recurso à migração de dados entre programas para completar tarefas (pe. 5Cube da CityLabs), o que se traduz em perda de tempo nos processos e perda de tempo em operações de certificação da integridade dos dados, que seriam dispensáveis caso fosse possível desenvolver todas as etapas processuais e de análise no mesmo programa, ou permite-se uma interactividade entre

¹⁷ Os programas SIG-T mais comercializados são: VISIUM; TRANSCAD; EMME; CityLabs; Aimsun e OmniTRANS.

programas, através de funções *plug-in* (pe. *Plug-in* do ArcGIS para o EMME);

- Não existe ainda um mercado de *free software* na área dos SIG-T, quer seja para *download* directo da internet, quer seja para usar a internet como plataforma de base operativa (Web SIG-T). O que existe, é a disponibilização de *scripts*¹⁸ e de pequenos e muito específicos programas para análise de redes, mas sem especificidade dos modelos de transporte ou dos programas SIG, e alguns apenas com um período gratuito para experimentação (p.ex. UCINET¹⁹; SANET²⁰). Existem também algumas aplicações de transportes que podem ser operacionalizadas através da Web (p. ex., VISIUM-*on line* no módulo de gestão de tráfego ou o OmniTRANS Real Time edition para gestão de tráfego), mas que não são um Web SIG-T.

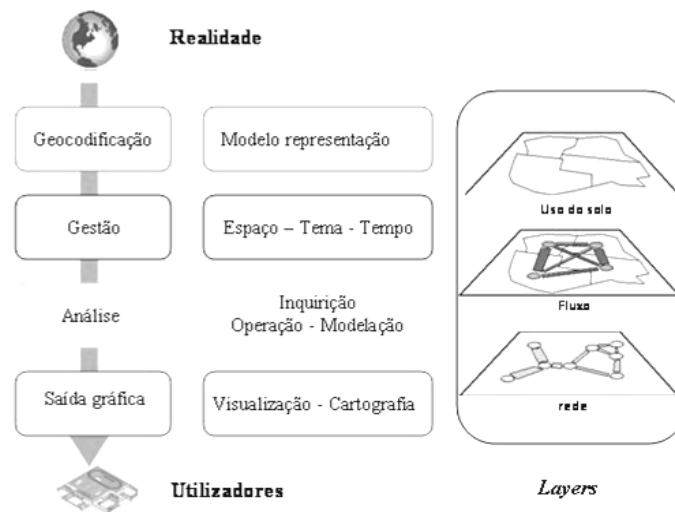
Segundo Rodrigue e Andrey, são 4 as componentes que os SIG para transportes devem ter (cf. Figura. 20), a fim de poderem conceber modelos fiáveis da realidade:

¹⁸ Texto que descreve os processos relativos à execução de um programa ou de uma determinada operação num programa. Caso um programa disponibilize um editor de script, significa que o utilizador pode adaptar o programa conforme as suas necessidades. Para estes casos é vulgar classificar o programa como de código aberto (*open source*).

¹⁹ Programa para análise de redes sociais e culturais, da *Analytic Technologies* (<http://www.analytictech.com/>).

²⁰ Caixa de ferramentas para análise de eventos que decorrem numa rede, a partir de um plug-in para o ArcGIS 9.3. (http://sanet.csis.u-tokyo.ac.jp/sub_page/about_sanet.html).

Figura 20 – Quatro componentes dos SIG-T



Adaptado²¹ de Rodrigue e Andrey, 2009.

- Geocodificação – que significa a atribuição de códigos (espaciais e topológicos) para o armazenamento dos dados e respectiva representação.
- Gestão – a informação geocodificada é normalmente armazenada numa base de dados, com uma estrutura organizativa com base em referenciais espaciais (país, região, unidades censitárias, etc.); referenciais temáticos (rio, auto-estrada, caminho-de-ferro, etc.); ou referenciais temporais (ano, mês, semana, etc.). O importante é que a base de dados seja desenhada e organizada de modo a poder integrar grandes volumes de informação multifonte e multiescala, garantindo a sua integridade.
- Análise – que pode ir de uma simples inquirição à base de dados (distância-tempo entre um determinado troço de auto-estrada) até a uma pesquisa complexa de relações entre objectos do sistema de transportes (que impacto no uso do solo ou na estrutura da rede se um determinado troço for eliminado da rede de transporte).

²¹ url: <http://www.people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch1en/meth1en/trspgis.html>, consultado em Setembro de 2009

- Saídas gráficas e visualização – trata-se de informar, sob a forma de mapa, gráfico, tabelas síntese e pequenos relatórios, os utilizadores acerca do que geralmente está encoberto nas relações espaciais dos objectos. Um SIG não é completo se não possuir ferramentas interactivas para tornar explícito e numa linguagem mais universal possível (o mapa) o que as bases de dados escondem, nomeadamente: a conectividade da rede, o estado do pavimento, as distâncias-tempo e distâncias-custo entre localidades, o risco de acidente por troço de estradas, etc.




Sem estas componentes, os SIG-T não estão dotados de capacidade funcional para a realização de modelos de transportes. “A large gulf exists between the rich features and attributes of transportation systems in the real world and the data models used for their representation within a computer”. (Miller e Shaw, 2001:53). Ainda a este respeito, McCormack e Nyerges referem que existem algumas funcionalidades SIG e.g., armazenamento, edição e saída gráfica que estão melhor dotadas para apoiar a modelação em transportes que outras, e.g., gestão, manipulação e análise. (McCormack e Nyerges, 1997).

Na realidade, o que é mais comum é a existência de programas SIG que vão contribuindo, pelas funcionalidades que os investigadores de transportes lhes reconhecem, para algumas fases de modelação em transportes (cf. tabela 3), mas poucos são os casos em que os SIG são parte integrante da investigação em transportes, para o desenvolvimento de modelos de análise. Assim, dos vários modelos de transportes (localização, uso do solo, grafos, optimização, gravítico, entropia, etc.), o que se permite verificar é uma ainda parca contribuição dos SIG (Andrey e Rodrigue, 2009; Shaw e Rodrigue, 2009).

Tabela 3 – Funções SIG utilizadas nas diferentes fases dos modelos sequenciais de transportes

| Funções SIG | Fases dos modelos sequenciais de transporte | | | | | |
|---|---|--------------------|-------------------------|-------------|------------------|-------------------------|
| | Zonamento | Geração de viagens | Distribuição de viagens | Opção modal | Afectação à rede | Análise de alternativas |
| Gestão de dados espaciais | | | | | | |
| Descrição | | | | | | |
| Estrutura da rede | | | | | | |
| Georreferenciação | | | | | | ? |
| Geo-relacionamento | | | | | | ? |
| Organização | | | | | | |
| Codificação (index) | | | | | | |
| Gestão de dados espaciais e alfanuméricos | | | | | | |
| Extracção de dados/criação de sub-esquemas | | | | | | |
| Tamanho da base de dados | | | | | | |
| Metadados | | | | | | |
| Catologação | | | | | | |
| Manipulação de dados espaciais | | | | | | |
| Conversão estrutura de dados | | | | | | |
| Conversão geométrica | | | | | | |
| Conversão de coordenadas | | | | | | |
| Recuperação selectiva | | | | | | |
| Classificação/análise por localização selectiva | | | | | | |
| Simplificação | | | | | | ? |
| Agregação | | | | | | |
| Desagregação | | | | | | |
| Clustering | | | | | | |
| Ligação | | | | | | |
| Hierarquia da rede | | ? | ? | ? | | ? |
| Manipulação de dados espaciais e alfanuméricos | | | | | | |
| Relação nó/arco | | | | | | |
| Segmentação dinâmica | | | | | | |
| Análise Espacial | | | | | | |
| Medidas geométricas e topológicas | | | | | | |
| Estatísticas descritivas | | | | | | |
| Estatística dedutiva ou inferencial | | | | | ? | |
| Operações de sobreposição | | | | | | |
| Índices topológicos de redes | | | | | | |
| Routing | | | | | | |
| Simulação | | | | | | |
| Linguagem de programação | | | | | | |

Adaptado de McCormack e Nyerges, 1997

 muito útil
  útil
  com potencial

Da leitura à tabela 3 pode-se verificar que as funções SIG são mais úteis na fase inicial (definição de zonas de análise) e final (afecção à rede) dos modelos clássicos de transportes. Nas outras fases, as suas potencialidades, segundo a comunidade dos transportes, são pouco desenvolvidas para darem o apoio necessário denotando dificuldades no manuseamento de atributos específicos, como fluxos destino, caminhos complexos e modificações temporais (Goodchild, 1998), e com algoritmos de análise espacial pouco sofisticados face à complexidade da informação afecta à modelação da rede de transportes (1999).

Também se podem interpretar os factos na perspectiva de que são os produtores de programas para análise de sistemas de transportes, que não exploram o suficiente as funcionalidades de análise espacial que os SIG têm para oferecer. Por parte dos utilizadores, a nota registada é que da relação cada vez mais próxima entre transportes e território, os estudos e projectos que académicos e profissionais têm desenvolvido, há uma maior exigência e necessidade em SIG-T mais evoluídos, já que o mercado verifica uma insuficiência.

Um problema típico, que espelha bem essa nota de insuficiência apontada aos programas SIG-T e que preocupa os analistas espaciais, prende-se com a determinação das fronteiras e das amostras, não obstante existir consenso sobre o facto dos fenómenos espaciais serem de natureza contínua e como tal, sem fronteiras fixas e radicais, mas sim *fuzzy*.²² Segundo Burrough, os limites desenhados em mapas temáticos e.g., solo, vegetação, geologia, etc., raramente são precisos, e representar as suas fronteiras com linhas finas conduz a erros topológicos e a uma incorrecção grosseira da realidade. (Burrough, 1989:477)

Para esta dissertação foi criado um modelo com aplicações específicas, ou seja um modelo ‘à medida’ das necessidades que os objectivos traçados colocaram (cf. Introdução). Para tal, foi forçoso o recurso à programação (cf. Cap.5), com a declaração da algoritmia à máquina a partir de um programa embutido (VBA) num programa anfitrião de ambiente SIG (*plug-in* para o ArcGIS 9.* e a precisar do módulo *Network Analyst*), de forma a poder integrar-se no modelo criado a variável localização

²² O termo *fuzzy* representa um método para modelar fenómenos que se encontram numa situação de impasse classificativo, mediante uma escala de probabilidade / graus de pertença ou de aptidão.

(georreferenciação) e a combinar a algoritmia de análise de redes, com as aplicações de análise espacial e estatística, bem como a visualização e a cartografia.

Em síntese, dir-se-ia que se desenvolveu um SIG-T, isto é um programa de base SIG, apostado nas funcionalidades de análise espacial e na georreferenciação, mas que integra e combina algoritmia de análise topológica dos modelos de transportes.

5. Modelo de Análise do Efeito Estruturante das Redes de Transporte no Território

A palavra modelo provém do italiano *modello*, uma derivação do Latim *modulus*, cuja raiz é *modu* que significa medida, o que confere ao conceito de modelo um teor de avaliação e de rigor. Mas falar-se de modelos para análise do território, implica falar de modelos em Geografia e, conseqüentemente, da sua importância no fazer Geografia, assim como dos problemas que foram persistindo, desde que os modelos foram usados de forma constante e sistemática nos estudos geográficos até à actualidade.

Desde as teorias economicistas de Adam Smith¹ (1776), às teorias de Thomas Malthus² (1805), que o espaço é considerado um recurso, um capital que precisa de ser bem gerido. É neste contexto, do espaço-recurso e do espaço-suporte físico, que a organização do território e a estruturação do espaço se assumem como vectores fundamentais para o desenvolvimento, e justificam a importância dos modelos espaciais.

¹ Considerado o pai da economia moderna e o mais importante teórico do liberalismo económico. Em “A Riqueza das Nações”, criticava o mercantilismo e defendia a doutrina da livre iniciativa, como forma de promoção do crescimento económico e bem-estar social.

² Apesar de economista, é também considerado um dos primeiros demógrafos. Dois dos seus mais conhecidos estudos: “Um ensaio sobre o princípio da população na medida em que afecta” (1798) e “Um ensaio sobre o princípio da população ou uma visão de seus efeitos passados e presentes na felicidade humana”, incluíam uma análise relacional entre demografia e economia, na perspectiva da escassez dos recursos.

O recurso aos modelos como forma de analisar, compreender, representar e explicar a natureza das interações e dinâmicas dos sistemas decorrentes do espaço geográfico, continua hoje tão fundamental, quanto o foram os modelos matemáticos da década de 1960 (Wilson, 2000:60).

No contexto desta dissertação, a complexidade da análise do sistema da rede de transportes requer o uso de uma geografia computacional, que embora ainda não se encontre conceptualmente bem definida na história fragmentada da Geografia moderna (Haggett, 2001:25), está já fortemente radicada, quer a nível profissional, quer a nível académico, no ensino das Ciências Geográficas.

Neste capítulo procura criar-se um novo modelo de análise espacial para verificação e medição do efeito estruturante que as redes de transporte têm no território. Para o efeito, o recurso à computação torna-se um imperativo técnico e científico, uma vez que só assim é possível superar o conjunto de obstáculos que condicionam o trabalho de investigação dos investigadores que estudam o território, nomeadamente grande volume de informação, combinação de cálculos, abstracção dos métodos matemáticos, experimentação de hipóteses em tempo útil, construção de cenários, confronto com outros métodos, e ao mesmo tempo combinar teoria, dados e algoritmia para obtenção de uma representação espacial que responda sobre as características, propriedades e estrutura da rede de transportes e comunicação (Torrens, 2000:6). Alguns autores designam esta Geografia fortemente alicerçada no uso dos computadores chamou-se de Geocomputação (Openshaw, 1996).

Este capítulo trata da modelação em Geografia. Mais concretamente, apresentam-se os procedimentos necessários à criação de um modelo de análise do efeito das redes de transportes e comunicação sobre o território. Para realizar este objectivo, o capítulo está dividido em três partes: uma primeira, de cariz conceptual e teórico, que versa sobre definições e conceitos fundamentais na modelação em Geografia e como têm evoluído ao longo do tempo, face às transformações científicas e tecnológicas que têm ocorrido, não apenas no seio da Geografia, mas também noutras ciências com as quais a Geografia tem sabido trabalhar. Uma segunda parte, mais computacional, em que se ensaia a pré-modelação, ou seja, em que se avalia e realiza a

aquisição, o armazenamento, a edição e se valida a informação geográfica que irá alimentar o modelo computacional. E, finalmente, uma terceira fase, que consiste na formalização do modelo e na sua operacionalização através de uma linguagem de programação orientada a objecto.

5.1. Conceitos fundamentais

Para explicarem o que entendem por modelo, é frequente os geógrafos recorrerem à definição de Haggett e Chorley: “a simplified version of reality, built in order to demonstrate certain of the properties of reality” (Haggett, 1965), completada dois anos depois “(...) Models are made necessary by the complexity of reality” (Haggett e Chorley, 1967). Posteriormente, já no século XXI, Haggett reedita uma nova versão da sua obra ‘Geography: A Global Synthesis’ em que acrescenta à definição a seguinte informação: “They are prop to our understanding and a source of working hypotheses for research. They convey not the whole truth, but a useful and apparently comprehensible part of it” (Haggett, 2001).

Numa tentativa de trazer consenso sobre a forma como os modelos podem ser classificados, Haggett sugere que os modelos podem ser vistos segundo três perspectivas diferentes: 1) a perspectiva substantiva, para se referir a uma representação pura; 2) a perspectiva adjectiva, quando se refere a uma representação ideal e, 3) o modelo como um verbo, para se referir a uma demonstração-tipo, como seja “...a model railway or a model husband...” (1965:19; 2001:23).

Outros autores (Ackoff *et al*)³ advogam que os modelos podem ser vistos como icónicos, análogos e simbólicos, em que cada um deles representa um grau maior de abstracção da realidade. Nesta perspectiva, os modelos de dados podem ser classificados de acordo com o nível de abstracção devem ser considerados em quatro níveis distintos:

Nível do mundo real – Contém os fenómenos geográficos reais a representar, tais como rios, ruas, topografia, uso do solo, etc.;

³ Citado por Haggett, 1965 in *Locational Analysis in Human Geography*. London. Edward Arnol:19

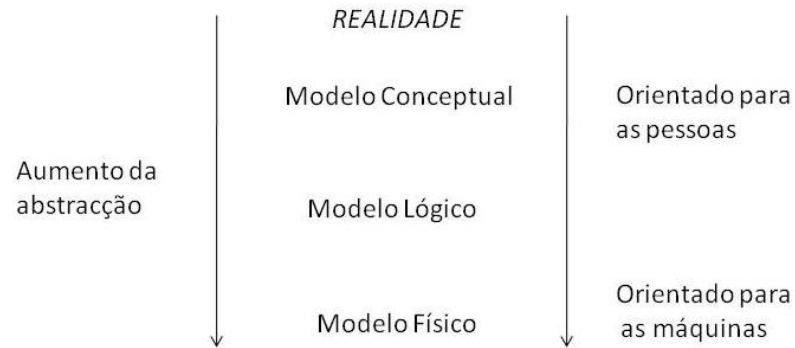
Nível conceptual – Teoria. Descreve o Mundo real a partir de um conjunto de conceitos formais com os quais as entidades geográficas podem ser modeladas;

Nível de apresentação – Oferece as ferramentas com as quais se pode especificar os diferentes aspectos visuais que as entidades geográficas têm de assumir ao longo do seu uso nas diferentes aplicações. É ainda neste nível que são definidas as categorias e classes de dados, o tipo de variáveis (contínuas ou discretas) e que são desenhadas as bases de dados;

Nível de Operacionalização - Define os padrões, as formas de armazenamento e as estruturas de dados a aplicar. É ainda nesta fase que se definem os tipos de relações entre as camadas de informação geográfica, as funções necessárias e os métodos utilizados.

Tal como Haggett e Ackoff, também Longley *et al* propõem uma forma de classificar os modelos, a saber: os modelos classificam-se de acordo com os níveis de abstracção que vão realizando, e que segundo eles são três os níveis de abstracção: modelos conceptuais (mais descritivos e orientados para serem compreensíveis por todos); modelos lógicos (menos generalistas, mas já detalhando níveis ou camadas de informação e a forma como se devem cruzar por etapas do modelo) e modelos físicos (abstractos e unicamente orientados para a sua operacionalização computacional). (Longley *et al*, 2001).

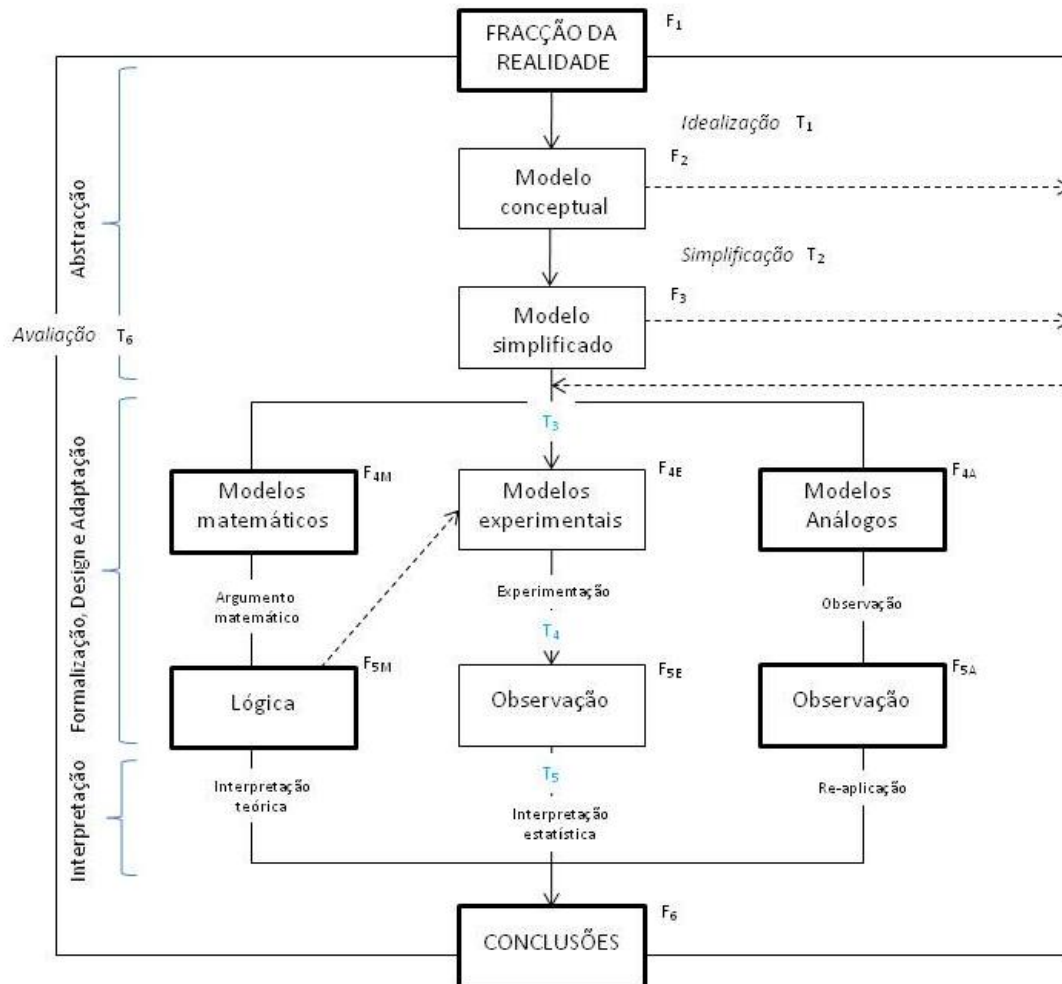
Figura 21 – Níveis de abstracção dos modelos



Adaptado de Longley *et al*, 2001

Com o intuito de criar um modelo dos modelos em Geografia, Chorley, em 1964 desenhou um diagrama onde expôs uma metodologia que deveria ser comum a todos os modelos espaciais (geográficos) e temporais (históricos), em que cada fase (F_i) do modelo é ligada sequencialmente por processos de transformação (T_j).

Figura 22 – Modelo dos modelos



Adaptado de Chorley, 1964:129

Na primeira secção, referente à abstracção, a preocupação relaciona-se com os processos de adequação à realidade, que devem ser ao mesmo tempo, complexos o bastante para que se possa melhor compreender a realidade, mas suficientemente simples, para que mantenha a exactidão e a veracidade. Um aspecto importante que Tobler refere, sobre o objectivo da modelação, é que todos os modelos procuram soluções simples para problemas cada vez mais complexos (Tobler, 1970).

A segunda secção integra três etapas fundamentais: o formalismo dos modelos matemáticos, o experimentalismo na modelação e a adaptabilidade dos modelos. Nesta secção, a principal preocupação apontada por Chorley consiste em conseguir modelos que sejam capazes de representar parte (a que interessa) dos sistemas idealizados.

Por fim, a terceira secção congrega os processos de transformação (interpretação teórica, interpretação estatística e reaplicação dos resultados ao sistema original), isto é os processos que permitem o confronto com a realidade, e a verificação teórica (lógica).

Aludindo à importância que os modelos têm na ciência, e particularmente na Geografia teórica e quantitativa, Wilson⁴ (1972) salienta a mudança radical que a introdução dos computadores veio trazer para a prática dos trabalhos geográficos.

O período anterior aos computadores é marcado pelos grandes obreiros dos primeiros modelos de localização espacial, e.g., Von Thunen (modelo lógico matemático), A. Weber (modelo analógico); W. Christaller e A. Losch e também aqueles que, sob o chapéu da Física social e mais focados na problemática das interações entre fenómenos, desenvolveram modelos do tipo gravítico (W. Reilly; K. Zipf e J. Stewart), e das migrações (E. Ravenstein e S. Stouffer).

Após o aparecimento dos primeiros computadores, por volta da década de 1950, Wilson identifica duas revoluções que contribuíram para o desenvolvimento da teoria em Geografia: a revolução estatística e a revolução modelística. Ambas são um reflexo da maior facilidade providenciada pelos computadores na operacionalização da informação espacial mediante o uso de técnicas de análise apoiadas em fundamentos teóricos.

A análise de redes é apontada por Wilson como um paradigma da revolução modelista (Wilson, 1972).

⁴ Wilson, Alan (1972). Theoretical geography: some speculations. Transactions of the Institute of British Geographers, nº 51: 3-44. JSTOR.

Enquanto na revolução estatística, Garrison e a escola de Washington da década de 1960 constituíram o marco mais relevante, na revolução modelística foram os trabalhos iniciais de Haggett e Chorley, mais precisamente, *Locational Analysis in Human Geography* (Haggett, 1965) e *Models in Geography* (Haggett e Chorley, 1967), que constituíram as principais referências.

Todavia, apesar do esforço de Wilson para dissipar alguma da ‘névoa’ que envolvia as denominações de Geografia teórica, Geografia quantitativa e modelos, um outro tipo de ‘ruído’ permanecia (provavelmente por ambos os conceitos aparecerem muitas das vezes associados), mais precisamente entre o conceito de modelo e o conceito de sistema. Numa tentativa de clarificação, alguns autores aproveitam a definição de modelo para estabelecer a diferença e sublinhar o que os relaciona. Odum, ao introduzir o conceito de ecossistema (sistema constituído pelas componentes bióticas e abióticas), foi provavelmente um dos primeiros a fazer essa ressalva ao mencionar que “Um modelo é uma formulação que imita um fenómeno do Mundo real...”, e que o Mundo real era o resultado da interacção dos sistemas. (Odum, 1988:9). Mas Odum não era geógrafo e o problema persistia no seio da Geografia.

Chisholm, aponta a ligação entre a Teoria Geral dos Sistemas⁵ (desenvolvida em torno do conceito de sistema) e a Geografia, identificando Chorley (1962) e Haggett (1965) como os principais responsáveis pela introdução do termo ‘teoria geral dos sistemas’ na literatura geográfica, sendo os exemplos sugeridos por Haggett um sustento desta sua afirmação (Chisholm, 1967).

Com efeito, Haggett apontava para a Geografia Física o exemplo de um sistema de erosão, cujas componentes eram os declives, as linhas de água e as bacias hidrográficas, que em interacção se manifestavam através da circulação da água, arrastamento de terra e da sedimentação. Como *input* do sistema apontava a chuva. Para a Geografia Humana, Haggett sugeria o sistema da região nodal; as componentes são as cidades, vilas, indústrias, etc., que manifestam a sua interacção pela circulação (possível pelo sistema de transportes) de pessoas, de dinheiro e de bens. O *input* energético do

⁵ Cf. BERTALANFFY, L. (1950) – An Outline of General System Theory. The British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 1, Nº2 :134-165.

sistema era as necessidades biológicas e sociais das comunidades. (Haggett, 1965:17).

Sobre os modelos e modelação é correcto afirmar-se que existe sempre uma certa subjectividade, na medida em que os modelos são orientados para o problema que procuram resolver e condicionados, quer pela informação possível, quer pela formação científica dos autores. Os modelos podem ser abordados e concebidos a partir de várias perspectivas e de múltiplas formas. Contudo, são os modelos que permitem aos investigadores focarem a sua atenção sobre aquilo que é substantivo no problema em causa, e filtrar o ‘ruído’ de forma a extrair as respostas às questões que levaram à sua criação.

Sobre a importância de se conhecer melhor o que são e perceber qual o papel que os modelos assumem, em particular nas ciências geográficas, Kuby *et al.* (2005:3) sublinham a necessidade de se criar uma classificação, com base em oito parâmetros:

- [1] A função (o que faz?): trata-se de saber exactamente aquilo que o modelo faz, e não tanto aquilo para o qual foi construído. Neste ponto, os autores indicam que os modelos podem ainda dividir-se em quatro tipos de acordo com a sua função:
 - a) Modelos descritivos - modelos que têm por objectivo representar a realidade e.g., mapas, redes, índices, diagramas e gráficos;
 - b) Modelos explicativos ou interpretativos - modelos que tentam responderem à questão: porquê?
 - c) Modelos preditivos⁶ - modelos que procuram prever o(s) resultado(s) com base num determinado conjunto de variáveis de entrada. Tentam responder à questão: e se?
 - d) Modelos determinísticos - modelos que determinam qual a melhor forma de actuar, face a um determinado problema.

⁶ Um modelo preditivo também pode ser um modelo determinístico (quando apresenta uma solução face a um dado conjunto de valores das variáveis de estudo) ou um modelo probabilístico (quando apresentam uma série de soluções possíveis – com os respectivos valores de probabilidade associada - para o tal conjunto de valores das variáveis de entrada).

- [2] A composição (de que é feito?): remete-nos para categorias de modelos que relevam da sua natureza, i.e., modelos físicos, modelos conceptuais ou como os autores afirmaram “as nearly all models of transport network topology are mathematical and/or graphical”. Kuby *et al.* (2005).
- [3] O mecanismo (os procedimentos causa-efeito estão incluídos no modelo?): Trata-se de diferenciar os modelos ‘processo-resposta’ dos modelos ‘caixa-preta’. Nos modelos ‘processo-resposta’, as componentes e as relações causa-efeito estão representados de forma explícita. Nos modelos ‘caixa-preta’, a relação causa-efeito está presente, mas não integra explicitamente o processo. Para melhor entendimento, considere-se como exemplo de um modelo ‘caixa-preta’, um grafo da relação entre o volume de tráfego e a velocidade média numa auto-estrada. A relação está implícita. Por outro lado, um modelo que procure simular o comportamento de um condutor é um modelo ‘processo-resposta’, em que a relação causa-efeito está explícita nos procedimentos do modelo. Ambos os modelos apresentam vantagens e desvantagens⁷, pelo que a decisão passa por saber o que melhor se adapta à natureza da informação e ao problema a resolver. Em muitos casos, recorre-se a modelos híbridos.
- [4] O Espaço (como considerar a dimensão espaço geográfico?): Nem todos os modelos consideram a dimensão espacial (p.ex. os modelos microeconómicos de oferta-procura), muito embora esta seja uma componente fundamental em muitos processos, especialmente nos que interessam aos geógrafos. Apesar da generalidade dos modelos sobre transportes serem explicitamente espaciais, a forma como tratam o espaço é um factor de distinção. Efectivamente, os modelos de transportes podem encarar a dimensão espaço de diversas formas: numa perspectiva gráfica: espaço linear (função distância a partir de um aeroporto, ou estação caminho-de-ferro), espaço topológico (grafo), espaço bidimensional (2D, mapa) ou tridimensional (3D, uma maquete); numa

⁷ “process-response models tend to be more complex, but not necessary more realistic because ...depend on accurate depiction of the underlying mechanisms whereas black-model can be finely tuned to the outcomes that one is trying to model. On the other hand, black-box models may be less generalizable outside of the context in which they were fitted, whereas process-response models may do far better and understanding interactions in a complete new context for which they are no data yet” (Kuby, *et al.*, 2005:4)

perspectiva computacional (p.ex em ambiente SIG): espaço contínuo, ou espaço discreto; espaço vector ou espaço matricial. Uma vez mais, as decisões passam, quer pela natureza da informação disponível, quer pelo tipo de problema a resolver ou a representar, sendo que tanto a complexidade como adequação do modelo são afectadas pela decisão tomada.

- [5] O tempo (como considerar a dimensão histórica?): Os modelos podem ser estáticos ou dinâmicos. Os modelos estáticos não conseguem considerar mais do que um período temporal, ao invés dos modelos dinâmicos que representam explicitamente vários períodos ao longo de uma determinada linha temporal. Os modelos dinâmicos podem ainda subdividir-se em modelos contínuos, permitindo a qualquer instante a ocorrência de um evento e os modelos discretos, que fazem quebras temporais entre várias representações de evento.
- [6] A certeza (os valores de *input* para o modelo são conhecidos com que grau de precisão?): Trata-se aqui de uma distinção entre modelos determinísticos e modelos probabilísticos ou estocásticos. Para os primeiros, conhecem-se bem os valores de *input*, pelo que para os mesmos dados de *input*, o modelo dará sempre as mesmas respostas. Nos segundos, para alguns valores existe incerteza, pelo que se lhes atribui um valor de distribuição probabilístico em vez de um valor exacto. Para estes modelos, ditos probabilísticos ou estocásticos, os resultados vêm sobre a forma de uma série de valores, cada um associado a uma probabilidade ou dão resultados ligeiramente diferentes sempre que o modelo for processado, independentemente de serem sempre os mesmos *inputs*, razão pela qual são processados diversas vezes, como é o caso dos modelos do tipo Monte Carlo.
- [7] As relações matemáticas (está-se presente um modelo linear ou não-linear?):
 - a) As relações matemáticas nos modelos podem ser lineares ou não-lineares. As funções lineares são vulgares, quer por produzirem resultados que são razoáveis aproximações da realidade, quer pelo manuseamento menos complexo dos métodos que integram. Para a construção de algoritmos, uma linguagem de programação linear,

com valores inteiros, permite facilmente modelar situações binárias (0, 1) como um sistema de apoio à decisão (p.ex. um modelo de decisão de redes de transporte, permite determinar se é viável ou não o investimento na infra-estrutura.).

b) Todavia, existem problemas que são não-lineares (p.ex: custo inerente a determinado traçado rodoviário) e cujas variáveis são muitas e nem sempre discretas. Estes são problemas que requerem um modelo não-linear de apoio à decisão.

- [8] A resolução ou escala (qual é a unidade mínima de análise?): A este nível, a grande distinção que se faz em modelos de transportes, é entre modelos agregados e modelos desagregados. Os modelos agregados modelam um conjunto de aspectos do sistema de transportes numa determinada área, e.g. concelho, região, metrópole, país, estado, etc. Os modelos desagregados, por outro lado modelam aspectos específicos e individuais, baseados na localização ou em características socioeconómicas, sem fronteiras administrativas ou estatísticas definidas.

Sobre os modelos em Geografia, a história diz que foram os modelos de sistemas de transporte ou os modelos territoriais dependentes do sistema de transporte (as variáveis, acessibilidade e mobilidade), os que inicialmente mais se destacaram (cf. Tabela 1) e que, segundo Chisholm, eram um bom exemplo do princípio geral que refere na teoria geral dos sistemas, de que todas as coisas estão relacionadas umas com as outras (Tobler, 1970) e que o significado de uma depende da sua relação com as outras (Bertalanffy, 1950).

Actualmente, com as tecnologias de tratamento de informação e, particularmente, com as capacidade de computação, a dominarem os mecanismos de desenvolvimento e de tendências sociais e científicas, novas disciplinas surgem a partir de outras mais clássicas e, contrariamente ao que seria esperado - mais disciplinas, mais opiniões, mais ‘ruído’ -, a verdade é que estas novas disciplinas e.g., SIG, CIG e a Geocomputação ajudaram a concertar divergências e a atingir consensos acerca de algumas questões sobre conceitos (como são os casos das interrogações em torno do

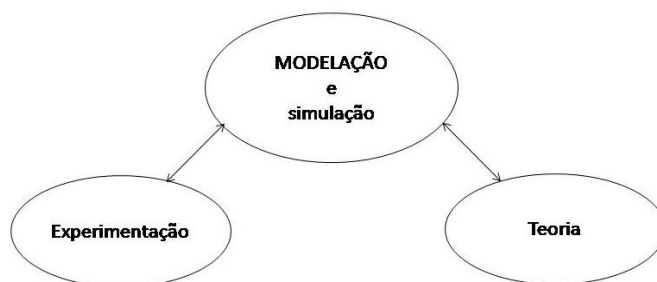
conceito de modelo e da interacção entre Geografia teórica e Geografia quantitativa actual) ao levantar de novo a discussão.

A este respeito, Fotheringham, Brunsdon e Charlton consideram que, apesar da geografia teórica e quantitativa ser considerada, por parte dos que estão fora da comunidade, como uma área estática de estudo, a verdade é que se tem verificado na última década um crescente e renovado interesse, não apenas metodológico e tecnológico que está obviamente implícito e é importante, mas também de base intelectual e formal, que reflecte as mudanças filosóficas na abordagem que os SIG e outras tecnologias de informação geográfica vieram trazer para a Geografia teórica e quantitativa (Fotheringham; Brunsdon; Charlton, 2000).

Neste renovado interesse podemos incluir métodos de análise espacial, a inteligência artificial, a modelação dinâmica espaço-tempo, a visualização e a análise espacial, as probabilidades e a incerteza, a estatística linear e não-linear, numa discussão em que Armstrong (2000) apela à relação entre a Geografia e a Ciência computacional⁸, sublinhando o papel que a modelação reassumiu nesta ‘nova Geografia’, computacionalmente intensiva no que toca aos métodos, à gestão e análise de informação, à modelação e simulação (cf. Figura 23), fecunda no que toca à teorização, sublinhando, assim, a definição de modelo já proposta por Wilson: “...a formal representation of a theory...” (Wilson, 1972:37).

⁸ “...it is important to draw a distinction between computational science and computer science. Through they are related, computational science is concerned with the application of computer technology to create knowledge in a particular problems domains” (Armstrong, 2000:146)

Figura 23 – Relação entre a Geografia e a Ciência computacional



Adaptado de Armstrong, 2000

Ainda sobre a computação no exercício da Geografia, Armstrong faz notar que muitos dos modelos existentes e praticados são de base espacial e são computacionalmente intensivos, e se os geógrafos ‘falharem’ na sua contribuição para este domínio, outros investigadores irão aproveitar e desenvolver métodos, fundamentalmente, espaciais e que são familiares à Geografia, apropriando-se deles e reinventando-os, criando novos conceitos e teorias. São estes os argumentos apresentados por Armstrong para sublinhar a razão pela qual os geógrafos se devem preocupar em desenvolver o seu trabalho numa perspectiva computacional (Armstrong, 2000).

No que se refere ao uso intensivo da computação e à importância dos modelos na análise de informação geográfica, novas disciplinas têm surgido. Uma das disciplinas que mais força tem vindo a assumir no seio da Geografia, tem sido a Geocomputação, cujo termo se atribui a Openshaw que o terá usado pela primeira vez em 1996, no intervalo de uma reunião preparativa para a organização de uma conferência intitulada Geografia Computacional, para promoção do recém-criado Centro de Geografia Computacional de Leeds (Openshaw, 2000).

A Geocomputação começou a conquistar maior popularidade a partir da década de 1990 e é apontada como a legítima herdeira da “Nova Geografia” ou da Geografia teórica e quantitativa⁹ surgida na década de 1960 (Openshaw, 1996; Abrahart, 1996;

⁹ Diz-se teórica e quantitativa porque é uma teoria construída a partir de métricas eg. repetidos processos, observações, hipóteses, modelos, validação e calibração até à re-formulação de princípios e ao re-início de todo o processo, para testar novas hipóteses.

Anselin, 1998; Longley, 1998; Batty, 2001; Sui, 2004), e embora se reconheça que a sua afirmação se deva aos SIG – Geocomputação é aquilo que sucede à criação da Base de Dados SIG e à representação de praticamente tudo o que pode ser representado a 2D e a 3D (Openshaw; Abrahart, 2000) –, mais concretamente ao facto de os SIG terem criado um ambiente mais ‘simpático’¹⁰ para a geocomputação, são domínios diferentes e portanto recorrem a conceitos diferentes.

A respeito desta diferenciação, Longley faz a ressalva de que: “The environment for geocomputation is provided by geographical information systems, yet what is distinctive about geocomputation is the creative and experimental use of GIS that entails. The hallmarks of geocomputation are those of research-led applications which emphasize process over form, dynamics over statics and interaction over passive response.” (Longley, 1998:3).

Para Torrens, a Geocomputação é composta por três componentes inter-relacionadas, que a definem:

- Trata a informação de base geográfica, sem constrangimentos de fonte ou formato (não precisa sequer de vir de um ambiente SIG);
- Utiliza tecnologias computacionais capazes de formular matematicamente um problema geográfico e de criar possíveis soluções, quer sob a forma gráfica (mapa, estatística, gráfico, imagem), quer sob a forma alfanumérica (tabela, texto).
- Tem elevada performance de processamento computacional (Torrens, 2004).

Pode afirmar-se que a geocomputação veio permitir a integração dos métodos da Geografia quantitativa com a mais evoluída tecnologia de análise espacial (Ono e Murayama, 2003:1), o que tem conduzido a um retomar da modelação nas ciências geográficas, com particular destaque para a Geografia.

¹⁰ O termo simpático (ou amigável), em computação significa a existência de um interface gráfico acessível a utilizadores menos experientes na computação e programas de código aberto.

No caso concreto dos modelos para estudar a topologia de uma rede de transportes, consoante os autores, os modelos construídos e aplicados são diversos e estruturam-se de forma diferente (Kuby; Taaffe; Gauthier; O’Kelly; Haggett). Tentando sintetizar as diferentes posições expostas na literatura da especialidade podem definir-se duas grandes linhas de abordagem: uma, que identifica sem nenhuma ordem ou hierarquia aparente, uma lista discricionária de modelos; outra que estrutura os modelos em categorias, classes e sub-classes.

A ilustrar estas duas diferentes abordagens veja-se o trabalho de Kuby *et al* (2005) para a primeira das situações em que identificam em forma de lista, seis grandes classes de modelos para o estudo da topologia das redes de transportes, a saber: SIG; Teoria dos grafos; Redes complexas; Programação matemática; Simulação e Agentes e Multi-Agentes. Para o segundo caso, o trabalho de Taaffe, Gauthier e O’Kelly divide os modelos em descritivos e analíticos (Taaffe *et al*, 1996).

Sobre a relevância do formalismo da Teoria dos Grafos, nos estudos de transportes, Haggett (2001:412) refere que estes providenciam apenas um passo inicial, e que as ferramentas mais evoluídas para uma análise do sistema de transportes são o ratio custo-benefício e os modelos de localização e alocação. Mas esta dissertação não trata de uma análise ao sistema de transporte, mas sim ao efeito das redes de transportes e comunicação sobre o território, mais precisamente sobre o sistema urbano. Nesta perspectiva, Haggett diz ainda que os grafos prestam-se a avaliar o delicado equilíbrio entre o sistema urbano e a rede de transportes, que lhes permite comunicarem e, consequentemente, ganhar vantagens relativas.

É neste enquadramento teórico, que se propôs criar um modelo SIG-T, cujo objectivo principal reside na capacidade de análise do efeito estruturante das redes de transportes e comunicação sobre o território, constituindo-se assim, simultaneamente, como um precioso instrumento de apoio ao exercício do planeamento e ordenamento territorial, e um instrumento de apoio à tomada de decisão fundamentada, por parte de gestores e outros intervenientes no território.

À parte do objectivo principal, o modelo criado (modelo *geo_grafo*) vem permitir a representação e uma melhor compreensão da relação entre os sistemas de transporte e o território, cuja escala ou complexidade da rede poderiam, de outra forma, colocá-los fora do nosso alcance de compreensão. Trata-se de um modelo geográfico - no que respeita ao seu objecto de estudo e natureza aplicativa -, de base matemática, formulado e compilado para correr num ambiente SIG, ou seja, para se programarem os algoritmos para serem aplicadas a qualquer conjunto de dados geográficos topológicos e georreferenciados, mediante uma aplicação *plugin*¹¹, num programa SIG hospedeiro.

5.2. Conceptualização do Modelo

A conceptualização do modelo consiste em estabelecer as relações fundamentais entre as diferentes fases processuais, que respeitam à categoria de fenómenos que se quer compreender. É geralmente apresentado e explicado mediante um esquema, de forma a tornar mais compreensível a arquitectura do projecto e o entrosamento das várias etapas que o estruturam. Deve ser acessível a um leitor menos familiarizado com linguagem técnica, e orientado numa lógica sequencial de etapas processuais desde a aquisição da informação, passando pelo armazenamento e a gestão da informação até à etapa da obtenção e visualização dos resultados, sempre em torno de um (ou mais) objectivo(s). (Longley *et al*, 2001; Matos, 2001).

Conscientes de que o espectro de aplicabilidade de um modelo é inversamente proporcional à sua especificação, a algoritmia programada invoca a Primeira Lei de Tobler (*TFL*) (Sui, 2004) permitindo a análise de quaisquer redes geográficas, embora o ensaio seja feito sobre as redes de transporte.

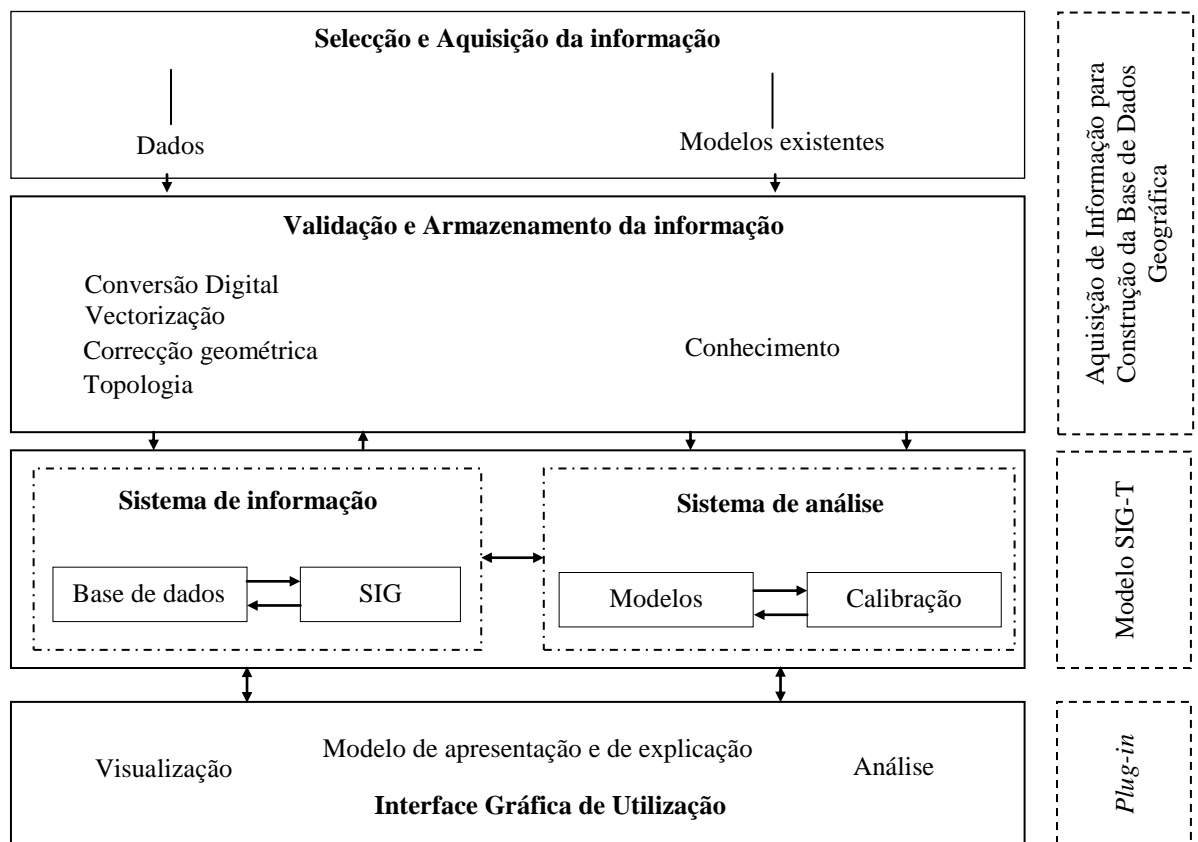
A fase de conceptualização do modelo antecede as fases de operacionalização do modelo e serve de guia ao desenvolvimento de todo o projecto, o que a transforma na

¹¹ Uma aplicação (programa de computador) que pode ser adicionada ao programa hospedeiro, para colmatar funcionalidades necessárias ao exercício de análise pretendido, e inexistentes no programa de base hospedeiro. É normalmente um programa mais leve e só é acrescentado ao programa base, quando o utilizador o requerer, mediante opção menu ou botão, no interface do programa hospedeiro. Pode dar acesso a um interface gráfico próprio, com campos de preenchimento para o utilizador (ordens opcionais que determinam as variáveis para o algoritmo analisar), ou ser apenas um botão de execução directa.

mais determinante das fases, uma vez que é, simultaneamente, aquela que é mais consumidora de tempo (implica pesquisa da informação, verificação das suas características e compatibilização de forma a integrar o sistema), e que é mais onerosa (apesar de cada vez mais existir informação digital disponível gratuitamente na internet, ainda não existe informação suficiente para se poder desenvolver um projecto técnico/científico; esta tem de ser adquirida nas instituições produtoras, que a vendem a valores proibitivos para particulares não financiados).

Para esta dissertação, o modelo geográfico conceptual estruturou-se em quatro módulos sequenciais que estão agrupados em três blocos operativos (Figura 24), segundo uma hierarquia funcional vertical, de cima para baixo, com níveis de complexidade cada vez maiores.

Figura 24 – Blocos do Modelo Conceptual



Adaptado de Grueau, 1994

O primeiro bloco do modelo conceptual (Aquisição de Informação para Construção da Base de Dados Geográfica) corresponde aos módulos 1 (selecção e aquisição de informação) e 2 (Validação e Armazenamento da informação geográfica). Trata-se, de uma forma sintética, de pesquisar fontes de dados possíveis para aquisição de informação que posteriormente possa alimentar o segundo bloco, suportando o sistema de informação e constituindo matéria-prima para ser operacionalizada.

A importância deste bloco, na estrutura do modelo e, consequentemente, no projecto, é fundamental, pois é da qualidade e adequação da informação que todo o modelo depende.

Na selecção da informação não pode haver lugar a equívocos ou ambiguidades. Todas as questões que se colocam à partida devem ser respondidas de forma cabal, nomeadamente, Que tipo de informação seleccionar? Que volume de informação? Quando é suficiente? Qual o estado (analógico ou digital) em que se encontra a informação? A que escala foi produzida? A que período temporal e espacial corresponde? Qual o sistema de projecção da informação cartográfica e que *datum* foi utilizado para a sua georreferenciação? Qual a entidade produtora? São apenas alguns exemplos das questões a que é necessário responder.

As características da informação têm também de estar conforme os objectivos do modelo e adequadas entre si, pelo que se ter dar especial atenção às características da própria informação espacial ou seja aos metadados¹². Existem dois níveis de informação sobre a informação, que devem ser acautelados logo na fase inicial de selecção. O primeiro constituído pelas informações de carácter geral que, independentemente da temática e objecto de estudo devem ser sempre consideradas (as questões acima mencionadas representam claramente este grupo); o segundo, com as informações de carácter particular, condicionadas à temática investigada e ao objecto de estudo. O ponto seguinte esmiúça algumas dessas questões, que se consideram fundamentais.

¹² “Os metadados de informação geográfica não são mais do que uma descrição textual, de forma normalizada, da informação geográfica. A sua documentação é indispensável para a identificação e avaliação técnica (escala, sistema de referência, qualidade, extensão geográfica e temporal) dos conjuntos de dados geográficos (CDG), assim como aspectos ligados ao acesso a serviços e dados e contactos dos responsáveis.” (Silva, 2009:1).

5.3. Base de dados de *features*¹³ lineares em SIG para a construção do modelo

Nesta fase inicial da construção de conhecimento no domínio dos SIG existe na bibliografia, uma certa ligeireza no uso e na aplicação dos termos dados, informação, objecto, entidade, característica, indicadores e índices. No âmbito desta dissertação, importa saber o que se entende por cada um destes termos:

Dados – informação no seu estado bruto, ou seja, sem tratamento específico. Normalmente, os dados resultam de uma primeira pesquisa e por isso, não estão em condições de poder integrar um SIG. São valores indicativos que vão permitir optar pelos tratamentos posteriores.

Ex: os mapas das redes de transporte; as tabelas dos recenseamentos gerais da população; etc.

Entidade, objecto e *característica* – designações que decorrem da tentativa de tradução do termo inglês *feature*, vulgarmente utilizado em CIG. Segundo Matos (2000) por entidade, entende-se qualquer fenómeno do ‘mundo-real’ não divisível em fenómenos semelhantes, e por objecto, a representação física (digital) dessa entidade, com a informação alfanumérica que lhe está associada.

Ex: estrada; ferrovia; lugar.

Indicadores – parâmetros que, isolados ou combinados, permitem os tratamentos de estatística e de espacialização referenciada pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG), com vista à análise e produção de informação nova. Não sendo obrigatoriamente numéricos (embora nesta dissertação sejam usados estritamente nesse sentido), os indicadores são de grande importância, na medida em que são sobretudo qualificativos.

Ex: grau de coesão de uma rede; potencial de interacção entre lugares; nível de acessibilidade de um nó.

¹³ Por força de muitos dos programas e literatura da especialidade ser maioritariamente produzida em língua inglesa, a terminologia corrente e mais universal é também inglesa. Contudo, alguns autores (Matos, 2000) têm defendido a tradução e adaptação dessa terminologia à língua materna. No caso português, a tradução possível é *característica*, termo que será usado em itálico, sempre que nos referirmos a *feature*.

Índices – resultam da agregação ou combinação dos indicadores, segundo vários métodos ou processos.

Ex: índice de dispersão da rede; índice de desenvolvimento de uma determinada região (inclui indicadores de conectividade e ligação da rede); índice de eficácia.

Geralmente acontece que os dados existentes (sobretudo quando são dados anteriores ao período de digitalização da informação geográfica)¹⁴ encontram-se desestruturados e desorganizados, não estando em condições de integração directa num SIG (estão em formato analógico, ficheiros CAD, formato dxf, etc.). É a forma como os dados se vão organizar, e como serão definidas as relações entre eles, que vai definir o modelo de dados geográficos.

Desta forma, para que os dados possam constituir informação geográfica válida para SIG, devem reunir três condições essenciais, que os distinguem de outros tipos de dados:

- Referenciação geográfica (georreferenciação): os dados geográficos devem estar localizados no espaço mediante um sistema de coordenadas referente a um sistema de projecção cartográfica. Este facto por si permite evidenciar de forma imediata a presença ou a ausência de padrões;
- Atributos: os dados geográficos devem estar relacionados com atributos alfanuméricos que definem ou descrevem, de forma mais ou menos simplificada, a sua natureza. Assim, cada elemento gráfico representa uma entidade no terreno (ferrovia, estrada, lugar, ...), a qual pode, por sua vez, ser caracterizada por um conjunto de atributos e respectivos valores (comprimento, população, acessibilidade, fluxo, entre outros)

¹⁴ Apesar de existirem outros projectos (cf. Cap.4) que antecedem a institucionalização do Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG), em 1986, foi esta a entidade que materializou uma vontade política nacional de digitalizar toda a cartografia temática e tratamento e classificação de imagens de satélite, com o intuito de criar uma base de dados de toda a informação de natureza geográfica, ou geograficamente referenciável, de âmbito nacional, regional e local. (Machado, 2000:321; CNIG, 1993:12)

- Relações topológicas entre os elementos: os elementos presentes no modelo de dados devem estar relacionados espacialmente tendo por base um conjunto de parâmetros (contiguidade, conectividade, sentido, proximidade, etc.). As relações entre entidades geográficas no mundo real são geralmente inúmeras e complexas, pelo que o seu armazenamento dentro do SIG deve ser feito de forma seleccionada, tendo em atenção a sua relevância para o estudo a efectuar ou modelo a construir.

Tendo em consideração que nesta dissertação faz-se uma análise espaço-temporal, a fonte de dados resulta assim de um acordo tripartido entre os períodos temporais em análise, o objecto de estudo, a existência ou não dos dados e a qualidade em que se encontram.

Tem-se então como fontes de dados para a Base de dados das rodovias:

- Mapa das Estradas Romanas extraído da publicação “Portugal Romano”, de Jorge Alarcão (1974), Ed. 33, e referente ao Itinerário de Antonino, redigido no Século III, d.C.
- Mapa dos Itinerários de Portugal 1800 extraído da publicação “Transportes e comunicação em Portugal, Açores e Madeira (1750-1850)”, de Artur Teodoro de Matos (1980).
- Mapa do Plano Rodoviário de 1945 extraído do Decreto-lei 34593, de 11 de Maio de 1945.
- Mapa do Plano Rodoviário Nacional de 1985 extraído do Decreto-lei 380/85, de 26 de Setembro de 1985.
- Mapa do Plano Rodoviário Nacional extraído do Decreto-lei 222/98, de 17 de Julho.

Ainda, e tal como referido acima, foi fundamental para a concretização da segunda fase do processo de aquisição de informação a partir dos mapas, uma outra

fonte de dados, a dos valores da população residente por lugares¹⁵, a partir dos Recenseamentos Gerais da População de 1940, 1991 e 2001.

Para todos estes mapas rodoviários que constituíram fonte de dados, o processo de aquisição e armazenamento de informação numa Base de dados geográfica da rede de transportes e comunicação para Portugal Continental desdobrou-se em três fases operacionais:

- Rasterização e georreferenciação dos mapas;
- Criação da Base de Dados Geográfica e vectorização das redes e dos nós (cruzamentos das linhas e lugares existentes à data, segundo os Censos, e referenciados no documento de base); e
- Conversão da geometria das redes em *características* topológicas.

Para especificar os procedimentos técnicos que levaram à aquisição de informação para a construção da base de dados geográfica das redes de transportes, descreve-se com mais pormenor, cada uma das fases operativas consignadas.

5.3.1. 1ª Fase operacional – Rasterização e georreferenciação dos mapas

Um documento rasterizado (ou digitalizado) não tem escala, ou seja as medidas que sobre ele se façam não correspondem às medidas reais, sobre o terreno. Para que se possa explorar utilmente esta informação, nomeadamente, cruzar com outra informação, fazer inquirições gráficas e alfanuméricas, medir distâncias, calcular áreas, perímetros, etc. é necessário proceder à sua correcção geométrica e à sua georreferenciação. Este procedimento consiste em identificar pontos no ficheiro e os seus correspondentes no terreno. Após esta identificação estabelece-se uma correspondência que permite ao

¹⁵ “Aglomerado populacional com dez ou mais alojamentos destinados à habitação de pessoas e com uma designação própria, independentemente de pertencer a uma ou mais freguesias.” (INE, 2001)

programa efectuar a correcção geométrica do ficheiro, bem como a sua georreferenciação, ficando cada ponto do documento ligado à sua localização no terreno.

O primeiro passo deste processo consistiu na selecção de um suporte cartográfico de referência adequado, ou seja, na escolha de uma base cartográfica que sirva de base a todo este processo. Para o efeito, a base cartográfica para efectuar o processo de georreferenciação foi a das cidades existentes ao ano de 2005¹⁶.

No passo seguinte seleccionaram-se os pontos (designados de pontos de controle) que permitem efectuar a correspondência entre as coordenadas da imagem, materializadas em linhas e colunas e as coordenadas rectangulares no terreno (da base cartográfica das cidades), medidas em unidades lineares (Matos, 2000).

Através da correcção geométrica ajustaram-se estas cartas, o que veio possibilitar uma compatibilização geográfica da informação. Embora existam vários métodos que permitem corrigir a rotação, translação e o factor de escala em X e Y, os mais utilizados são os seguintes (cf. tabela 4):

- Transformação de Helmert (linear): As formas são preservadas após a transformação;
- Transformação *Afim* (linear): Usualmente aplicado em imagens de satélite. As formas não são preservadas nesta transformação, mas as linhas paralelas permanecem paralelas;
- Método de polinómios de 2º grau (método complexo de transformação): Os graus de complexidade do polinómio são expressos no seu expoente. Este método permite a utilização de polinómios até 5º grau.

¹⁶ Base cartográfica georreferenciada a partir das tabelas de cidades oficiais In SALGUEIRO, B. (2005) – Cidade e Sistema Urbano. Geografia de Portugal (cord. Medeiros). Vo.2:176-189.

Tabela 4 – Métodos para georreferenciação de imagens

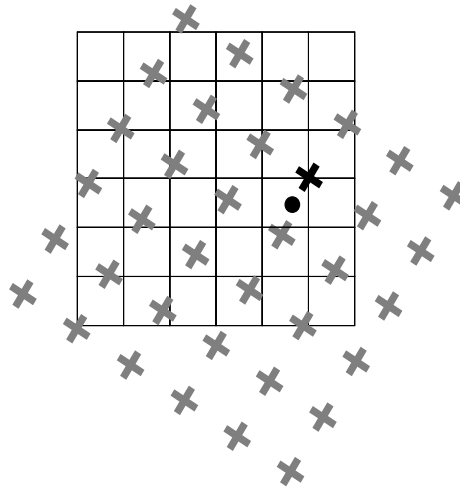
| Modelo | Número de Pontos de Controlo | Ajustamento da Imagem |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Helmert | 2 | Opcional |
| Polinomial de 1º Grau (Afim) | 3 | Opcional |
| Polinomial de 2º Grau | 6 | Obrigatório |

Quando um método de transformação é não linear¹⁷, tem que se utilizar um outro método para ajustamento da área definida com os pontos de controlo, para que seja efectuada a identificação da malha da imagem original com a malha criada pelos métodos de transformação (não lineares) utilizados, num procedimento que consiste numa interpolação a partir dos valores de pixéis vizinhos para criar a nova imagem ajustada à área de georreferenciação.

O processo mais rápido de interpolação é o do método do vizinho mais próximo, que em termos de cálculo utiliza apenas o valor do pixel mais próximo, isto é, escolhe o pixel que tenha o centro mais próximo do ponto localizado na imagem inicial. Este pixel é depois transferido para a sua posição (cf. Figura 25) correspondente na imagem final (georreferenciada). A desvantagem desta técnica é que introduz distorções geométricas localizadas.

¹⁷ Note-se que não existe uma relação directa entre o recurso aos métodos de ordem superior e o melhor ajustamento, pois normalmente os polinómios de 3ª, 4ª e 5ª ordem podem levar a resultados indesejáveis, como a distorção exagerada da imagem.

Figura 25 – Correção geométrica de uma imagem pelo método
do vizinho mais próximo



Adaptado de Lo e Yeung, 2002

Quando se efectuam estas operações de georreferenciação e ajustamento de imagem, é necessário avaliar a precisão da transformação efectuada confrontando-se o resultado da imagem (consoante o método de transformação utilizado) e dos pontos de controlo. Às diferenças entre os pontos de controlo e os pontos que se definem na imagem para identificação, designam-se de valores residuais, correspondem na prática à diferença entre a localização medida e a localização após transformação, em que.

$$x \text{ residual} = x \text{ medido} - x' \text{ após transformação}$$

$$y \text{ residual} = y \text{ medido} - y' \text{ após transformação}$$

Idealmente, x' é igual a x e y' a y , mas esta situação raramente se verifica. Qualquer discrepância entre estes dois conjuntos de valores indica a persistência de distorções geométricas na imagem, mesmo depois do processo de georreferenciação. Uma forma de medir estas distorções é calcular o Desvio Quadrático Médio (DQM) para cada ponto de controlo, através da expressão:

$$DQM = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}$$

Calculando-se o DQM para todos os pontos de controlo é possível observar qual o ponto com maior erro e calcular o DQM médio (DQMm). Normalmente, o analista especifica um certo valor (limiar) de DQMm ultrapassado o qual a transformação não é aceite.

Tendo por referência a norma técnica de acuidade visual que é de 0,2 mm ou 0,0002m¹⁸, consoante a escala de base do documento cartográfico a georreferenciar e o número de pontos de controlo utilizados, pode determinar-se a qualidade da georreferenciação por cálculo do DMQ, transformando em erro no terreno (cf. tabela 5).

Tabela 5 - Erro aproximado segundo a escala e o número de pontos de controlo

| Escala | Número de pontos de controlo | | | | |
|------------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 4 | 6 | 9 | 12 | 16 |
| 1:5000 | ± 1,10 m | ± 1,05 m | ± 1,01 m | ± 0,99 m | ± 0,97 m |
| | ± 0,74 m | ± 0,70 m | ± 0,68 m | ± 0,66 m | ± 0,65 m |
| 1:25 000 | ± 5,5 m | ± 5,4 m | ± 5,1 m | ± 5,0 m | ± 4,9 m |
| | ± 3,7 m | ± 3,5 m | ± 3,4 m | ± 3,3 m | ± 3,3 m |
| 1:50 000 | ± 11,0 m | ± 10,5 m | ± 10,1 m | ± 9,9 m | ± 9,7 m |
| | ± 7,3 m | ± 7,0 m | ± 6,8 m | ± 6,6 m | ± 6,5 m |
| 1:100 000 | ± 21,9 m | ± 21,0 m | ± 20,3 m | ± 19,8 m | ± 19,4 m |
| | ± 14,7 m | ± 14,0 m | ± 13,5 m | ± 13,3 m | ± 13,0 m |

Adaptado de Tsakiris *et al* (1994)

Se este valor for ultrapassado é comum:

- Apagar o ponto de controlo com maior erro;
- Recalcular os coeficientes;

¹⁸ Menor precisão gráfica possível de ser observada a olho nu (sadio e sem uso de qualquer instrumento de apoio).

- Recalcular o DQM para os restantes pontos de controlo;
- Os processos repetem-se até que o DQMm seja igual ou inferior ao limiar especificado, ou
- Aceitam-se os valores obtidos, quando todas as hipóteses de melhoramento do DQM não se aplicam.

Para esta dissertação, a tabela 6 abaixo faz a síntese das transformações efectuadas, a saber: dos métodos de georreferenciação utilizados, do número de pontos de controlo e dos valores de DQMm obtidos, para cada uma das imagens referentes às redes rodoviárias consideradas.

Tabela 6 – Síntese dos Métodos e processos de georreferenciação¹⁹

| | Nº pontos | Método | DQMm |
|-----------------------------|-----------|----------------------|--------|
| Rede de Estradas Romanas | 9 | Polinómio de 2º grau | 7478.3 |
| Rede de Itinerários de 1800 | 12 | Polinómio de 3º grau | 1564.2 |
| PRN45 | 14 | Método Afim | 641.6 |
| PRN85 | 47 | Polinómio de 2º grau | 4143.7 |
| PRN2000 | 4 | Método Afim | 239.5 |

Embora o erro diminua com o aumento do número de pontos, teoricamente não é necessário utilizar mais do que os suficientes para que os coeficientes do polinómio sejam estimados, pois os documentos rasterizados representam o território de uma forma geral e plana. Outra nota a registar é que dependendo da qualidade do ficheiro-imagem para rasterização (qualidade determinada pelo rigor cartográfico e pelo estado do documento), melhor ou pior será a georreferenciação, atestado pelo valor de DQM.

¹⁹ Para todas as imagens a georreferenciar, o sistema de projecção adoptado foi o Hayford-Gauss, datum Lisboa.

5.3.2. 2ª fase operacional - Criação da Base de Dados Geográfica e vectorização das redes e dos nós

Uma base de dados é uma colecção de dados estruturados e armazenados de uma forma normalizada, segundo um dado modelo relacional²⁰, orientado a objecto²¹, ou ambos. Uma base de dados geográfica é simplesmente uma base de dados que contem dados localizados geograficamente para um assunto e para uma área particular. As bases de dados geográficos constituem uma parte fundamental de um sistema operacional de informação geográfica²², devido sobretudo à importância que tem sobre todas as actividades de análise, modelação e tomadas de decisão.

A utilização do Sistema de Gestão de Bases de dados (SGBD) para ‘cuidar’ dos dados geográficos oferece inúmeras vantagens em relação aos modelos tradicionais de armazenamento, das quais se podem destacar:

- A recolha de todos os dados para um único ficheiro, o que reduz a redundância e a duplicação;
- Diminuir os custos de manutenção devido a uma melhor organização e ao controlo da redundância;
- O conhecimento do utilizador pode ser transferido mais rapidamente entre aplicações, porque a base de dados permanece constante;
- A segurança e o nível dos dados assim como o seu acesso podem ser pré-definidos;

²⁰ BD organizada em tabelas bidimensionais, em que cada linha é um registo, representativo de uma entidade, e cada coluna, um campo da tabela, representativo dos seus atributos. Entre tabelas diferentes, pode-se estabelecer um tipo especial de ligação (1-para-1; 1-para-n; n-para-n), a partir de um campo comum, que garante o relacionamento entre tabelas, sem que haja duplicação de registos. (Gaspar, 2004:41).

²¹ Um objecto pode ser qualquer coisa relevante, distinta das outras, caracterizada por um conjunto de atributos e sobre o qual se podem executar acções (Ramos, 2007:18). Assim, um modelo orientado a objecto é um modelo em que todas as etapas, processos, características, métodos e operações são consideradas objecto e como tal devem ser descritos na Linguagem de Programação (LP).

²² Sistema de Gestão de Bases de Dados (SGBD).

- Todos os registos têm como atributo um referencial espacial (tem coordenadas), o que permite a visualização simultânea da tabela e da sua distribuição espacial, sob a forma de mapa.

A Base de Dados Geográfica que se construiu para o modelo SIG-T designado de *geo_grafo* é condicionada, quer pelo objectivo e o objecto da dissertação, quer pelo programa hospedeiro adoptado (o ArcGis) e estrutura-se na forma, no que no léxico deste programa se denomina de *Geodatabase*²³.

As *geodatabases* estruturam os dados geográficos numa estrutura hierárquica de objectos, organizados em classes de objectos, classes de entidades e conjuntos de entidades. Uma classe de entidades corresponde a um conjunto de entidades com o mesmo tipo de geometria e os mesmos atributos. Um conjunto de entidades é um grupo de classes de entidades que partilham a mesma referência espacial.

As classes de entidades que correspondem a entidades simples podem ser organizadas, quer dentro, quer fora dos conjuntos de entidades. A forma de organização da informação, pelas classes de entidades, é muito semelhante à de um directório num sistema de ficheiros. As classes de entidade que necessitem de armazenar uma estrutura topológica têm obrigatoriamente de estar inseridas num conjunto de entidades de forma a garantir uma referência espacial comum, como é o caso das redes rodoviárias, objecto desta dissertação.

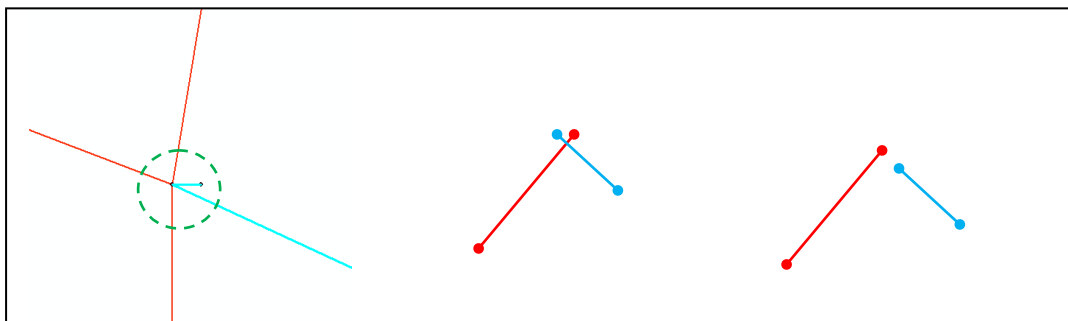
Obedecendo a esta lógica, os dados são adquiridos através da vectorização sobre imagem. Este processo tem a vantagem de possibilitar a ampliação da imagem de base, o que se traduz num substancial ganho de rigor da informação recolhida, face a outros métodos de vectorização, como p. ex. a vectorização sobre mesa digitalizadora, que resulta numa tendência para a pormenorização excessiva, leva por vezes a uma maior morosidade processual.

²³ É a designação da ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.) para o Sistema de Gestão de Base de Dados implementado nos seus produtos ArcGIS. Trata-se de um repositório de informação geográfica (objectos, entidades e características) e das relações topológicas que estabelecem. (ESRI, 2003).

O processo de vectorização, para além de cuidado no rigor do traçado em respeito da geometria das redes, tem de ser igualmente alvo de grande atenção e cuidado, no que respeita à quebra da linha e criação dos nós (*snap - endpoints*), a fim de evitar situações de erro (cf. Figura 26) em que o não reconhecimento da correspondência da mesma entidade, compromete a topologia e, conseqüentemente, a fase de análise.

A não utilização da ferramenta ‘*snap*’ no processo de vectorização, assim como a não interrupção das linhas onde se pretende criar um nó, pode conduzir a erros graves (cf. Figura 26) que vão deturpar a leitura e os cálculos das medidas topológicas de análise de redes (cf. Cap. 6).

Figura 26 – Exemplo de erros típicos da vectorização: *switch-back*; *overshoot* e *undershoot*.



Em que:

- *Switch-back* – é a situação em que o desenhador, quase sempre de uma forma involuntária, faz pequenos recuos com o rato aquando do processo de vectorização de uma linha. Daí resultam pequenos (quase imperceptíveis sem o exercício do aumento de imagem) segmentos de linha, que não existem na realidade;
- *Overshoot* – é outro erro típico que decorre de não se fazer uma junção perfeita entre as extremidades das duas ou mais linhas vectorizadas e conseqüente criação do nó. Uma vez mais, os segmentos de linha que se

sobrepõem não são perceptíveis à escala de trabalho do desenhador, o que dificulta a sua detecção a olho;

- *Undershoot* – é um erro em tudo semelhante ao overshoot, com a diferença de neste caso o desenhador não sobrepor as linhas. Nesta situação, as linhas ficam ligeiramente distanciadas nas suas extremidades e a não criação do nó fica a dever-se a uma distância de separação, que é mais uma vez, imperceptível sem o recurso a procedimentos de detecção automáticos.

Todas estas situações têm de ser rectificadas topologicamente, para que sejam corrigidas e fiquem unicamente os nós em que cada arco termina e outro se inicia.

Assim, para além da geometria da rede ser adulterada, também a própria topologia é corrompida, quer através das relações que a *Geodatabase* vai armazenar, quer dos valores das medidas de conectividade e centralidade a calcular. Dos exemplos representados na figura 26, os erros levam à criação de mais um arco e de também mais um nó na rede, o que deturpa desde logo todos os valores caracterizadores, quer da estrutura da rede, quer das componentes.

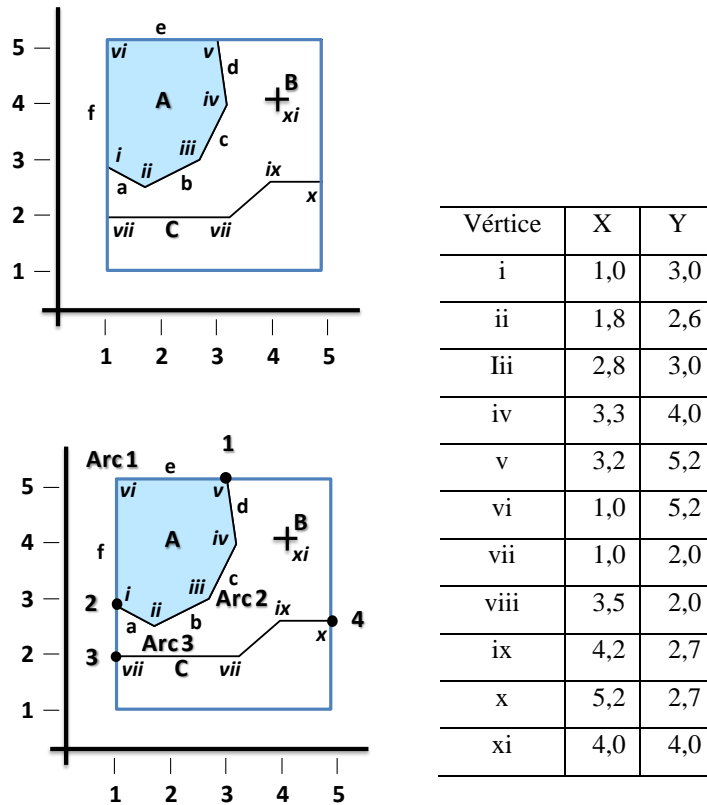
5.3.3. 3ª fase operacional – Conversão da geometria das redes em características topológicas.

Como o processo de criação topológica é interactivo, ou seja é realizado de uma forma dinâmica ao mesmo tempo que os objectos são adicionados à base de dados, logo quando, por exemplo, se adicionam vias de comunicação através da ferramenta de vectorização interactiva, e antes de cada objecto ser confirmado na base de dados, é necessário verificar as conexões topológicas para confirmar se o objectivo é válido, isto é, se está conforme com a realidade que se analisa e com as regras pré-estabelecidas para os objectos na base de dados.

Para uma *característica* tipo linha, o modelo topológico do ArcGis/ArcInfo é o DIME (cf. Cap. 4), em que os atributos das *características* são organizados de uma forma específica: os nós (intersecções de linhas) são identificados por códigos, em que

se atribui um código direccional sob a forma de “*From Node*“ (FN) e “*To Node*“ (TN), e as coordenadas são explicitamente definidas para cada ligação/conexão, a partir das componentes, arco, nó e polígono ou área (cf. Figuras 27).

Figuras 27 – Estrutura organizativa da topologia na *Geodatabase*



Coordenadas dos vértices e nós de todos os arcos

| ARC | FN | Vértices | TN |
|-----|----------|---------------------|----------|
| 1 | 3.2, 5.2 | 1, 5.2 | 1,3 |
| 2 | 1,3 | 1.8,2.6 2.8,3 3.3,4 | 3.2, 5.2 |
| 3 | 1,2 | 3.5,2 4.2,2.7 | 5.2,2.7 |

| Topologia dos arcos | | | | |
|---------------------|----|----|------------------|-------------------|
| ARC | FN | TN | Polígono Direito | Polígono Esquerdo |
| 1 | 1 | 2 | Externo | A |
| 2 | 2 | 1 | Externo | A |
| 3 | 3 | 4 | Externo | Externo |

| Topologia dos polígonos | |
|-------------------------|-------|
| Polígono | Arcos |
| A | 1, 2 |

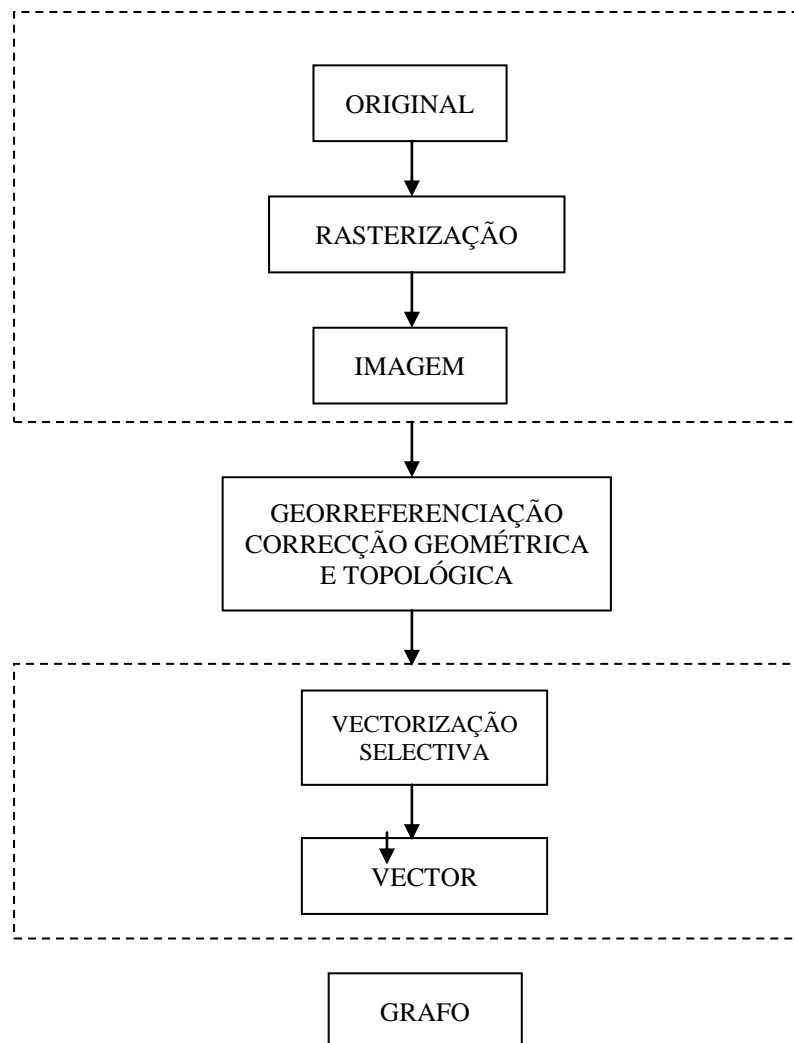
| Topologia dos nós | |
|-------------------|-------|
| Nó | Arcos |
| 1 | 1,2 |
| 2 | 1,2 |
| 3 | 3 |
| 4 | 4 |
| 5 | 5 |

A geometria da *Geodatabase* utilizada consiste em linhas que se estruturam por conjunto de pontos (início, fim e inflexões) e que representam as redes rodoviárias analisadas. Com a sua introdução na *Geodatabase* devidamente armazenadas e estruturada, o 1º bloco do modelo conceptual está realizado (cf. Figura 24), assim como o sub-bloco (Base de Dados e SIG) do 2º bloco do modelo conceptual: Modelo SIG-T.

Precisamente, com a construção das *Geodatabases* correspondentes a cada uma das redes viárias a analisar, e.g. Estradas Romanas; Itinerários de 1800; PRN45; PRN85 e o PRN2000, está completa a Base de Dados, e com a georreferenciação e a criação de

atributos (comprimento das vias entre nós e população residente por lugar), o sub-bloco composto por Sistema de Análise são passíveis de ser operacionalizados.

Figura 28 – Esquema processual síntese do 1º bloco do Modelo conceptual



Em termos de importância, este 2º bloco (Modelo SIG-T) é o *core* do projecto de investigação, uma vez que é nele que se articulam os procedimentos técnicos, com o experimentalismo científico e a criação de conhecimento sob a forma de resultados quantitativos e qualitativos. É a partir deste modelo que se pode fazer um diagnóstico acerca da conectividade da rede, da sua maturação, da acessibilidade e centralidade dos nós que a compõem e da influência que provocam na hierarquia dos lugares, assim

como da dinâmica de interacção que exercem entre si, da eficácia e da vulnerabilidade da rede (cf. Cap. 6).

A análise é para diferentes períodos temporais, e permite não apenas verificar os padrões estruturantes da rede, no espaço e no tempo, assim como também permite traçar cenários possíveis, medindo a importância de um ou mais arcos na rede, e testando a sua coesão e conectividade.

O bloco em que se constrói o modelo SIG-T - a partir de dois módulos de igual complexidade na arquitectura do projecto: o módulo do sistema de informação, que consiste numa construção da Base de Dados Geográfica de *características* topológicas linha, em SIG; e o módulo sistema de análise, em que através de uma linguagem de programação orientada a objecto, se desenvolveu e compilou algoritmos para análise topológica das redes de transporte, em ambiente SIG -, é o que deu origem ao modelo a que se chamou de *geo_grafo*.

A última etapa computacional do projecto (criação de processos de visualização de análises métricas às propriedades das redes produzidas e armazenadas numa *geodatabase*.) sintetiza-se na criação de um *plug-in*, ou seja um botão que surgirá no IGU do *programa* ArcGIS, e a partir do qual o utilizador dá ordem de execução aos procedimentos do modelo *geo_grafo* sem que tenha de aceder ao *VBA* interface.

5.4. Implementação do Modelo SIG-T *geo_grafo*

De cariz eminentemente técnico, este subcapítulo não trata de programação computacional, ou de uma linguagem de programação em particular, mas de descrever o processo de “implementação do modelo SIG-T”. Mais especificamente, nele se demonstra a arquitectura do programa (como se organizou e estruturou o programa codificado segundo uma linguagem de programação simbólica) e explicar como funciona, de forma a proceder-se às diversas análises dos grafos.

5.4.1. Desenho e estrutura do programa

Quando surgiram os primeiros computadores, a palavra de ordem dos programadores era eficiência, ou seja, conseguir criar programas que exigissem o mínimo possível dos recursos máquina, já que estes eram muito limitados, quer no que respeita à capacidade de memória, quer no que respeita ao volume de informação a processar. Desta forma, os programas iniciais eram feitos num único bloco monolítico de código, isto é, com um pequeno número de linhas de código e poucas variáveis, já que a divisão do programa em vários blocos iria exigir mais memória e superior capacidade de processamento de informação.

Contudo, à medida que a tecnologia foi evoluindo e novos recursos computacionais de maior capacidade foram sendo disponibilizados, os programadores viram expandido as possibilidades de desenvolver aplicações mais complexas para resolução de problemas também mais complexos. Assim, em resposta, os programadores desenvolveram uma técnica que consistia em dividir os problemas em porções e resolvê-los de forma independente, mediante módulos²⁴, o que não permitiu não apenas a resolução faseada dos problemas como desejável, mas também a ordenação do fluxo de controlo do programa e a possibilidade de reutilização do código em outros programas, assim como para resolução de outros problemas²⁵.

Para medir e qualificar o efeito das rodovias na estruturação do território, o programa - isto é a estrutura dos algoritmos que permitem indicar à máquina os cálculos a fazer, a tipologia dos *outputs* e o armazenamento dos ficheiros criados -, foi estruturado em cinco módulos²⁶, cuja descrição breve é apresentada na tabela 7 (para descrição completa, ver Anexo).

²⁴ Em ciências da computação, a designação refere-se a um conjunto de declarações para outros tantos procedimentos.

²⁵ A programação em blocos, ao fazer tramitar de bloco para bloco apenas os valores relevantes veio facilitar a organização lógica dos procedimentos e, ao mesmo tempo permitir a execução independente dos diversos procedimentos, que puderam ser optimizados e entregues para desenvolvimento a equipas de programadores/analistas.

Tabela 7 – Módulos que estruturam o algoritmo utilizado

| # | Módulo | Descrição |
|---|---------------------|--|
| 1 | Main | Módulo onde é definida a sequência de operações a executar |
| 2 | CMatrix | Módulo que permite representar a estrutura de dados numa matriz e onde estão definidas as operações de cálculo algébrico elementares como adição multiplicação, etc. |
| 3 | NetworksMXDAnalysis | Módulo que permite extrair os grafos no formato específico do SIG (geometria de linha e ponto) usado para o formato de matriz. O resultado é a disponibilização para os outros módulos de 3 matrizes: de conectividade (C); de distâncias (D); e de modelo gravítico (Pi). |
| 4 | Dijkstra | Módulo que permite determinar a matriz de caminhos topológicos mais curtos entre cada dois nós de um dado grafo dado na forma de matriz. É um dos pontos essenciais dos procedimentos utilizados. |
| 5 | NetworkMatrix | Módulo que permite calcular os índices de conectividade e acessibilidade de grafos (dados na forma matricial) e exportá-los para ficheiros em formato de texto. Disponibiliza também um algoritmo de cálculo de sub-grafos a partir de um dado grafo na forma de matriz. |

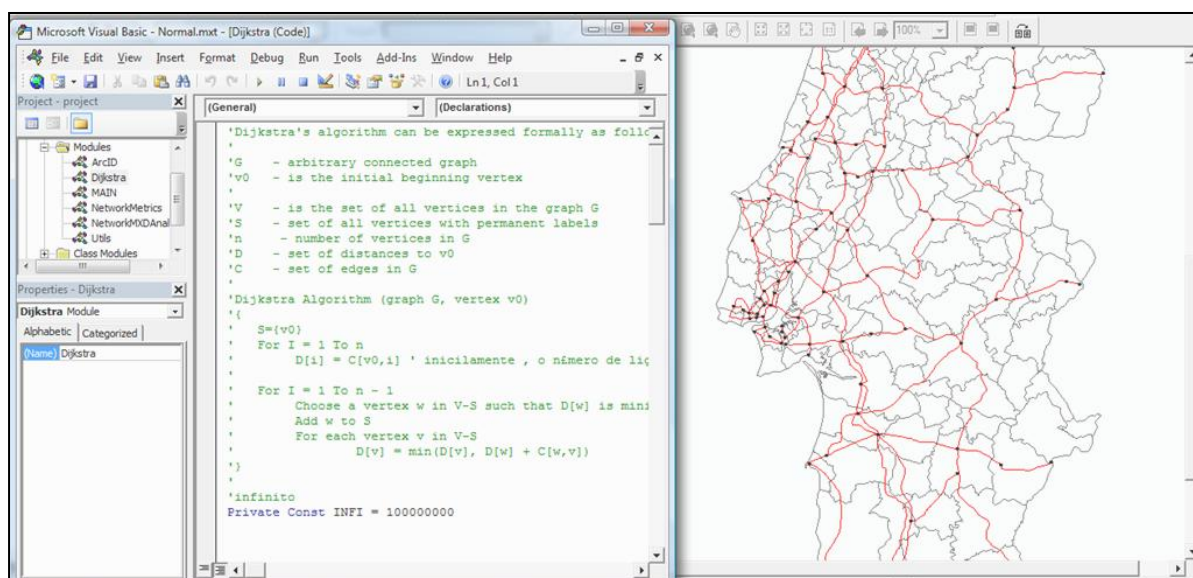
Devido ao facto de apenas através do cálculo de matrizes se conseguir os algoritmos para as medidas de acessibilidade e centralidade levou a uma situação de dúvida quanto ao tipo de linguagem de programação (LP) mais adequada a utilizar. O facto de não existir a representação de matriz no *VBA*, ao contrário de uma LP como o *FORTRAN*²⁷, levou a que se considerasse a hipótese de a preterir. No entanto, a LP *VBA* tinha a vantagem de estar embutida num ambiente SIG, ou seja, de correr sobre um programa SIG hospedeiro (ela teve de ser encapsulada), facto que acabou por pesar mais na decisão final, em acordo com outros critérios como, o tempo de cálculo e a facilidade de programação e utilização, por utilizadores menos experimentados.

²⁷ Linguagem de programação inicialmente desenvolvida por Backus para computadores IBM, por altura de 1957, destinava-se a aplicações numérico-científicas. Era uma linguagem de grande eficiência computacional, porque utilizava poucos recursos (memória e processador) da máquina.

5.4.2. Funcionamento do programa

A figura abaixo (Figura 29) serve para exemplificar a lógica de funcionamento do programa criado. O interface do lado esquerdo (*Microsoft Visual Basic Editor*) é onde estão implementados os códigos e é accionado o programa para análise das *features*, visualizadas no lado direito, no *display* do ArcMap.

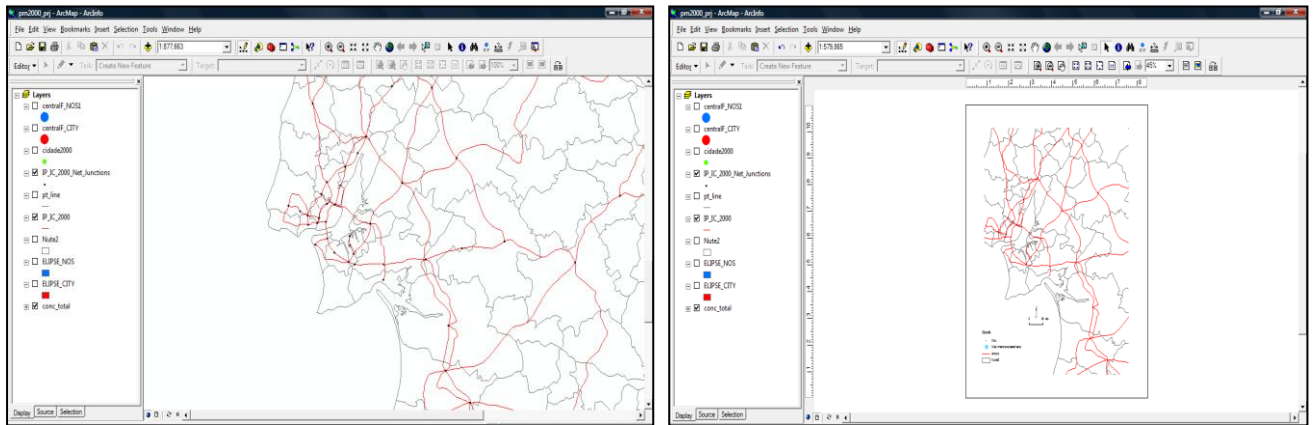
Figura 29 - Interface do programa criado em VBA sobre o interface de visualização do programa hospedeiro (ArcMap)



A funcionalidade do modelo *geo_grafo* é assim potenciada pela combinação das valências das aplicações do ArcGIS (ArcMap, ArcCatalog e ArcToolbox) e do código do programa embutido. Efectivamente, da parte do programa SIG hospedeiro são aproveitadas as seguintes valências, de acordo com as aplicações:

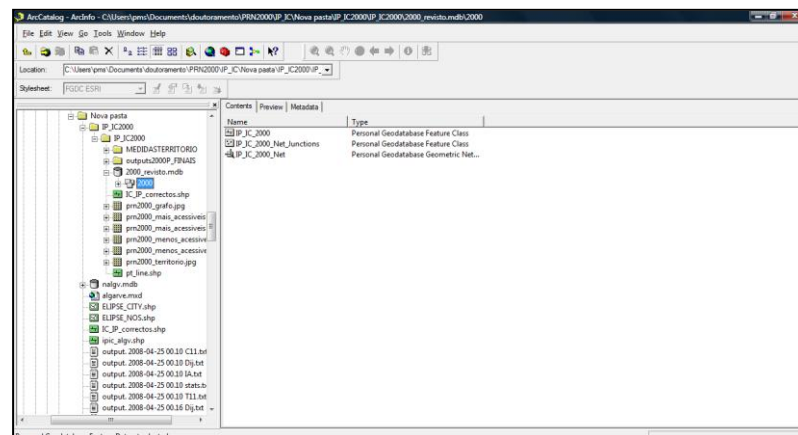
- I) ArcMap – faculta a visualização das *características*, a sobreposição de *características*, a edição das *características* (vectorização da rede e a adição de novos atributos na tabela), e preparação do mapa temático, proporcionadas pela aplicação ArcMap (Figura 30);

Figura 30 – Interface gráfico do ArcMap, para visualização e sobreposição das *características* de rodovias (lado esquerdo) e preparação da saída gráfica do mapa temático (lado direito).



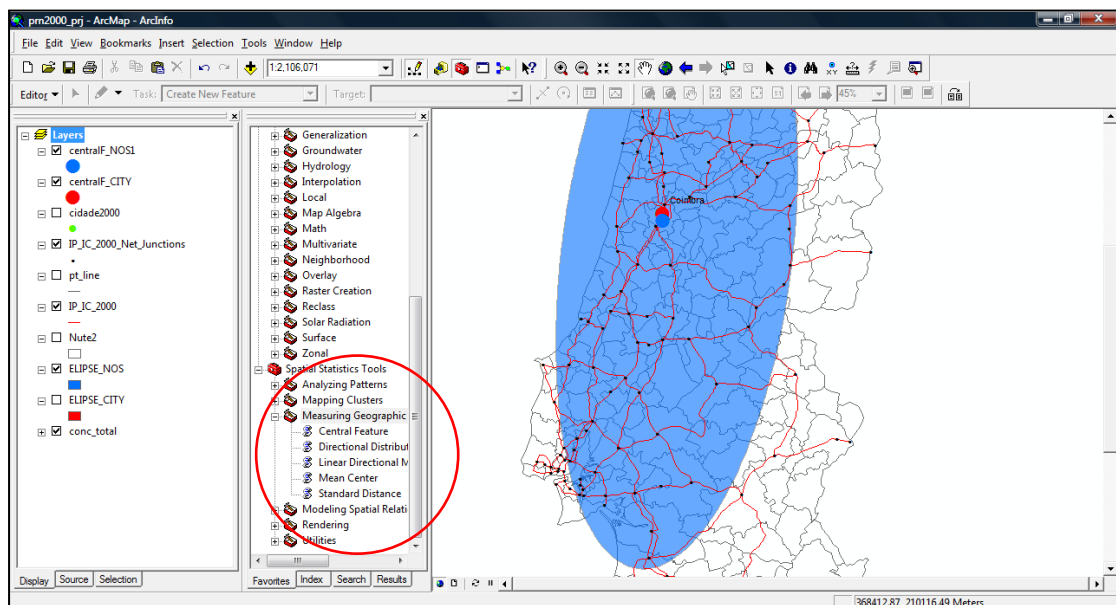
- II) ArcCatalog – permite ao utilizador, as funções de construção da *geodatabase*, da *features dataset* (família de *características*) e conversão da *característica* vectorial numa estrutura topológica (Figura 31).

Figura 31 – interface gráfico do ArcCatalog, para construção da *geodatabase*



- III) ArcToolbox – disponibiliza as ferramentas de cálculo e de análise espacial (medidas de distribuição espacial) como métricas de caracterização dos diversos modelos *geo_grafo* analisados (cf. Figura. 32).

Figura 32 – interface do ArcToolbox, com lista de medidas de distribuição espacial (circulo a encarnado) e visualização dos resultados no visualizador do ArcMap.



Sobre a aplicação do modelo *geo_grafo* e dos resultados obtidos, no capítulo seguinte far-se-à uma descrição e análise pormenorizada, que permite compreender o território através do papel de cada uma das métricas, quer topológicas, quer geográficas, combinadas.

5.5. Interface Gráfico do Utilizador (IGU) e *Plug-in* SIG-T

São dois os propósitos para a criação de um Interface Gráfico do Utilizador (IGU): tornar o método de análise mais apelativo e ‘amigável’ para o utilizador comum e encapsular os processos computacionais de maior complexidade, minimizando a aversão à sua utilização que é geralmente repetida pelo utilizador comum menos entendido em computação, e minimizando a hipótese de erros no sistema.

O encapsulamento, segundo Matos (2001:165), é um procedimento que consiste em ocultar ao utilizador comum a complexidade dos procedimentos a efectuar, pela utilização de uma escolha pré-configurada ou com opções múltiplas, mas também pré-definidas em que o utilizador toma a decisão sem necessidade de formular o algoritmo completo. O funcionamento interno do sistema é-lhe totalmente escondido e o utilizador pode dispensá-lo, bastando-lhe saber qual o tema em questão e mediante as opções a tomar, do leque que o interface lhe disponibiliza (botões e comandos), testar cenários e verificar resultados. As operações desenrolam-se por ordem do utilizador, mas sem as discriminar, nem as visualizar; apenas lhe sendo apresentado o resultado.

Uma outra vantagem do encapsulamento é o de garantir a segurança do objecto²⁸ (encapsular pressupõe programação orientada a objectos), garantindo a integridade e a qualidade e coesão do comportamento do processo escolhido.

Remontando ao caso concreto desta dissertação, o IGU “encobre” os procedimentos codificados no modelo *geo_grafo*, e embutidos num programa SIG, sintetizando-os sob a forma de menus e botões e comandos, e disponibilizando os resultados em ficheiros do tipo *txt*, com indicação de data e hora de execução.

²⁸ Na programação orientada a objectos, o objecto significa praticamente tudo, uma entidade física, uma função ou operação, uma variável, um qualquer elemento que esteja claramente definido (individual) na estrutura do programa e que tenha uma aplicação concreta.

6. Análise dos Resultados

Num trabalho de cariz metodológico, o capítulo que apresenta os resultados é o capítulo de maior relevância, pois é nele que:

- Se testam e validam (ou não) as hipóteses colocadas ao longo das várias etapas do projecto;
- Se verifica a importância da informação geográfica, quer a adquirida, quer a produzida;
- Se (re)constrói o modelo de análise e se ajustam os métodos;
- Se parametriza o modelo e
- No caso concreto em análise, cria-se conhecimento, a partir de padrões (espaciais e métricos) revelados pelas propriedades das redes.

Em Geografia, é consensual o princípio, de que o sucesso de qualquer actividade humana depende da sua localização e que as infra-estruturas de transportes e comunicação sempre induziram a mudanças na localização relativa dos aglomerados populacionais (Garrison, 1960; Haggett, 1965, Gaspar, 1981, Mitchell, 2000; Castells, 2002; Gorman e Kulkarni, 2003; Black, 2003), assim como na sua criação, crescimento e ou desaparecimento.

É frequente encontrar-se na literatura da especialidade referência ao impacto provocado pelos sistemas de transportes na organização espacial (Cortesão, 1964; Salgueiro, 1971; Matos, 1980; Hall, 1988; Alegria, 1990; Ascher, 2001; Gaspar, 1970 e 2006; Santa-Rita, 2006, entre muitos outros), mas poucos são os trabalhos que o demonstram, com fundamentação empírica e demonstração quantitativa. A omissão de uma análise espacial de

base quantitativa, sobre a influência (e o grau dessa influência) dos transportes sobre o território, deixa que fiquem por responder algumas questões fundamentais, tais como: Que métodos são geralmente utilizados para medir esse impacto? De que tratam os métodos e como se caracterizam? Como construir e desenvolver o(s) modelo(s) que operacionalize(m) esses métodos? Quais os mais comuns e eficazes em determinado contexto? Como é trabalhada e integrada a informação num modelo? Qual a importância do espaço (geografia) na análise de redes? E por último, como se devem interpretar e representar os resultados?

Quanto aos modelos, métodos e informação mais utilizados, muitas das respostas foram já dadas em capítulos anteriores. Contudo, no que respeita à importância da Geografia (leia-se os conceitos espaciais de localização, de distância, de conectividade, de acessibilidade, de centralidade, de relação, de adjacência e de vizinhança) na análise de redes, só se dará conta agora, por meio da modelação computacional e do formalismo da Teoria dos grafos.

De uma perspectiva geográfica, o estudo do território através da análise ao sistema de transportes pela Teoria dos Grafos e das Redes Complexas, implica numa primeira instância uma análise à estrutura da rede, que sublinhe as características que relevam das medidas de conectividade e de ligação, particularmente úteis na comparação das redes e na sua evolução ao longo do tempo (Garrinson, 1960; Garrison e Marble, 1961; Taaffe, Morrill e Gould, 1963; Watts; Strogatz, 1998; Barabasi, 2002). Numa segunda fase, seguem-se as medidas de acessibilidade, uma actualização e melhoramento das medidas de conectividade na análise das redes pelas propriedades das suas componentes (Garrinson, 1960; Taaffe e Gauthier, 1973; O'Sullivan, 2000; Jiang, 2006; Xu, 2007), as quais permitem concluir acerca da acessibilidade e da centralidade dos nós na rede, de que resulta uma ordem ou uma hierarquia.

Em ambos os casos, ao simplificar-se e representar-se de forma abstracta a rede de transportes sob a forma de grafo, passa-se a dispor de um espectro de ferramentas, quer para exploração das propriedades topológicas e físicas das redes, quer para avaliar o seu impacto no território, medindo a teia de relações entre os lugares ao longo do processo de evolução das redes. No entanto, conforme se fez nota atrás (cf. cap. 2), a geografia nem sempre foi considerada uma variável de análise (Jiang, 2006). Antes pelo contrário, o factor localização foi geralmente ignorado na análise das redes. A justificar tal facto pode apontar-se duas razões:

- O carácter abstracto dos grafos, e
- A inexistência à data de programas SIG.

Mais recentemente, no virar do século XX para o século XXI, surge uma nova ciência, designada Ciência das Redes (Watts, 1998; Bersini, 2005) ou Redes Complexas (Dorogovtsev e Mendes, 2003), para fazer face ao carácter dinâmico e à crescente complexidade que as redes têm vindo a adquirir. De base matemática, assente na Teoria dos Grafos, a análise de redes por via das Redes Complexas, vai permitir determinar propriedades como: ‘Mundo pequeno’, o coeficiente de *clustering* e os *hubs*, vulgarmente referidos na literatura da especialidade simplesmente como Problema do ‘Mundo pequeno’ (Watts e Strogatz, 1998; Batty, 2001; Jiang, 2006; Xu e Sui, 2007). Entre outros aspectos, do ponto de vista geográfico é particularmente relevante a indicação das métricas relativas à eficácia da rede ou ainda à medida do seu grau de vulnerabilidade (Dorogovtsev e Mendes, 2003; Gorman e Kulkarni, 2003; Jiang, 2006), assim como as relativas à avaliação da influência de uns nós relativamente aos outros.

Com o intuito de parametrizar o modelo *geo_grafo* e verificar tendências, faz-se uso das medidas de distribuição espacial, e.g. o ponto mais central e a elipse de tendência, para confronto com os resultados apurados pelas medidas de acessibilidade e de conectividade do modelo computacional desenvolvido e para avaliar a distribuição direccional dos nós e da tendência espacio-temporal que se desenha sobre o território. De salientar ainda que todos os procedimentos referentes às análises a efectuar são efectuados em ambiente SIG, com informação georreferenciada, o que permite a análise visual, assim como a produção de *outputs* gráficos sob a forma de mapas em tempo ‘útil’, ou seja, à medida que as transformações vão ocorrendo, o que não seria possível com outros programas (cf. cap. 4) de análise topológica de redes.

Face ao exposto, nesta dissertação, a metodologia encetada foca-se nas medidas topológicas para determinar as propriedades das redes, estruturando-se numa abordagem faseada no tempo (procurando a dinâmica das redes), através das transformações ocorridas na rede de infra-estruturas rodoviárias. Pretende-se assim, não apenas medir o efeito das redes na organização espacial e na relação que estabelecem com o grau de desenvolvimento do País, sua eficácia, coesão e vulnerabilidade, mas também avaliar como estes processos decorrem

das transformações ocorridas nas redes ao longo do seu processo natural de transformação, com o aparecimento e desaparecimento de arcos e de nós.

Para concretizar esta metodologia, o capítulo de análise dos resultados organiza-se em três partes operativas e uma parte comparativa. As partes operativas correspondem à análise do efeito estruturante da rede rodoviária sobre o território de Portugal Continental, mediante um modelo de base isotrópico (cf. 6.1.), que ignora a distância física como factor de atrito; um modelo de base anisotrópico (cf. 6.2.), que integra a distância física entre os lugares; e um modelo ‘Mundo pequeno’ (cf. 6.3.), para medir a eficácia da rede. A parte comparativa (cf. 6.4.) consiste numa síntese assente em três fases: medidas estruturais e de conectividade; medidas de acessibilidade e centralidade, assim como medidas de distribuição espacial, de forma a sublinhar os padrões emergentes.

De uma forma mais pormenorizada, para análise das propriedades que emanam do tipo de estrutura da rede e dos seus nós e arcos, faz-se uso, quer das medidas de conectividade e ligação, quer das medidas de acessibilidade e centralidade, respectivamente, no que respeita à teoria dos grafos (cf. Cap. 2). Sobre as medidas de acessibilidade e centralidade, o formalismo matemático utilizado foi de base matricial, que não permite apenas analisar as medidas de acessibilidade e centralidade, mas também evidenciar outras características e propriedades das redes, tais como: a eficácia da rede em providenciar a ocorrência de fluxos (cf. 6.4.) entre nós (os lugares) e avaliar o potencial de interacção que exercem uns sobre os outros, em função da distância que os separa e da sua massa (cf. 6.3.).

Existem várias matrizes (conectividade, acessibilidade e ponderadas) para analisar a rede individualmente, do ponto de vista das suas componentes. Contudo são as matrizes D (das distâncias topológicas mais curtas) e L (das distâncias físicas mais curtas) que melhor estabelecem uma hierarquia de lugares, e mais permite analisar as configurações e padrões espaciais que se desenham, ao longo do tempo (Kansky, 1963; Taaffe e Gauthier, 1973).

Todavia, entre as duas existem diferenças que importa assinalar. Enquanto a matriz D da distância topológica assume que todas e cada uma das ligações entre os nós têm igual valor no cálculo da acessibilidade, ou seja, pode ser igualmente influente a estrada Lisboa/Queluz como a estrada Lisboa/Porto; a matriz L, das distâncias físicas é sensível à existência, quer de pequenas, quer de grandes ligações, dando-lhe ponderações diferentes na determinação da

acessibilidade dos lugares. Assim está-se perante dois modelos de abordagem diferentes para a análise de redes e o seu efeito na organização espacial: considera-se o primeiro caso como o modelo isotrópico e o segundo caso, o modelo anisotrópico.

Por fim, no que respeita ao objecto de estudo, foram as redes materiais (Brunnet, 1996), as redes rodoviárias e as suas antecessoras, as redes de estradas e os itinerários as infra-estruturas escolhidas para avaliar o modelo concebido. Para que este permitisse a análise à dinâmica das redes, e a análise comparativa do sistema rodoviário de Portugal Continental e a sua influência na organização espacial e relação com o nível de desenvolvimento do País, considerou-se as redes de estradas de diferentes períodos temporais: estradas Romanas¹ (datadas do séc. III d.C.), as estradas (itinerários) do período do pré-fontismo (1800), as estradas do primeiro Plano rodoviário (1945), e as estradas do segundo (1985) e terceiro Plano Rodoviário Nacional (2000), das quais se obtiveram, por via do modelo criado (cf. Cap. 5), os resultados que a seguir se analisam.

6.1. Modelo Isotrópico para análise do efeito das redes de transportes rodoviários na organização espacial

A origem da palavra isotropia vem do grego *iso+tropic*. O termo *iso* significa igualdade ou semelhança e o termo *tropic*, significa mudança ou alteração (Porto Editora, 2010). Quando precedida da palavra modelo, isotropia adquire a função de adjectivo, o que significa ter iguais características físicas, e.g. condutividade, elasticidade, etc., independentemente, da direcção de movimento do corpo num espaço.

O termo foi inicialmente adoptado na Geografia Física, para explicar as propriedades dos cristais, enquanto na Geografia Humana o termo serviu para classificar os modelos económicos e os modelos de interacção espacial (Weber, Christaller, Losch, Burgess, Hoyt, Alonso, Isaard, Haggett, etc.) da primeira metade do Século XX da década de 1900 (cf. Tabela 1), quanto à forma como consideravam o espaço, e.g. espaço isotrópico (o que significa que este mantém as mesmas características independentemente da direcção) e o

¹ “Há ainda noutros lugares do Portugal romano, conhecidos através das fontes latinas ou gregas, que foram identificados. A identificação de alguns outros não é segura. A principal dessas fontes é o itinerário de Antonino. É um roteiro das vias do Império Romano, com indicação das cidades ou estações de muda (*mansiones*) por onde essas vias passavam (...). Foi redigido no início do Século III d. C., mas posteriormente corrigido.” (Alarcão, 1974:64).

espaço anisotrópico (o que significa que o espaço sofria alterações graduais ou descontínuas, consoante as direcções). Nesta primeira fase operativa, o espaço é considerado como sendo isotrópico, ou seja, todos os arcos têm o mesmo peso, independentemente da distância física entre lugares.

Do exposto no capítulo 2 (teoria dos grafos) acerca das medidas de análise para caracterização das propriedades das redes e avaliação do seu efeito sobre o território, mais propriamente sobre o papel que induz na organização espacial, destaca-se dois tipos de medidas:

- As medidas para análise da estrutura geral da rede, também chamadas de medidas de conectividade e ligação, e
- As medidas para análise interna da rede ou medidas de acessibilidade e centralidade.

Das primeiras releva o contributo do índice alfa (α) e o índice gama (γ), o mais representativo das medidas de conectividade, fundamental na comparação de diferentes redes de transportes e na avaliação do seu desenvolvimento no tempo. Uma vez que, a expansão e a intensificação das ligações entre os nós está directamente relacionada com a procura da rede de transporte, com o intuito de deslocar pessoas e bens, diz-se que o grau de conectividade da rede constitui um indicador de complexidade espacial, bem como do nível de desenvolvimento do país ou da região a que a rede respeita (Garrison e Marble, 1961). Embora menos determinantes, os índices de coesão (Cst) e do grau de desenvolvimento (Gp) complementam o índice gama (γ) e dão indicações seguras sobre o estado de maturação da rede.

Quanto às medidas de análise interna da rede, elas constituem uma actualização e um refinamento das medidas de conectividade e dão uma perspectiva mais fiável acerca do impacto das redes sobre o território, nomeadamente no que respeita à organização do sistema urbano, com a criação, deslocação, transformação e desaparecimento de centros, grupos e periferias. Pode afirmar-se que as medidas de acessibilidade constituem um melhoramento às medidas topológicas da Teoria dos Grafos para análise da influência das redes de transportes no território (Garrison, 1960; Taaffe e Gauthier, 1973). A estas, e com o intuito de descobrir outras propriedades nas redes que os métodos tradicionais omitiam (Batty, 2001), juntam-se

as medidas decorrentes das redes complexas, e.g. Mundo pequeno, coeficiente de *clustering* e *Hub's* e o índice de Freeman ou grau de intermediação.

Com os resultados obtidos são construídas tabelas com a hierarquia dos lugares, segundo os indicadores de acessibilidade e centralidade. Contudo, devido à dimensão² do número de arcos e de nós das redes, só se incluirá nos quadros os 20 lugares mais acessíveis e os 20 menos acessíveis, ficando os restantes ficheiros derivados dos cálculos das matrizes, na sua total extensão, em anexo.

Nota-se ainda que, apenas para a rede de Estradas Romanas se fará esta análise para todas as matrizes, isto é as matrizes C^1 e C^n ; T^1 e T^n ; D e L^1 e L^n (as matrizes L são matrizes ponderadas, pelo que apenas no ponto 6.3 referente ao modelo anisotrópico se fará a sua leitura). A razão de tal opção deve-se quer ao facto de as Estradas Romanas apresentarem um menor número de nós e arcos que as outras redes de estradas em análise. Além de que assim, pode servir para demonstrar a importância do cálculo de matrizes na análise de variação da acessibilidade em função do tempo.

Para as restantes redes de estradas, apenas a matriz D , por ser a mais representativa das medidas topológicas de acessibilidade e centralidade, e a matriz ponderada L^n , de distâncias físicas, são representadas e analisadas em texto, para a fase operativa referente ao modelo isotrópico, e para o cálculo do modelo operativo anisotrópico, respectivamente.

² Dada a dimensão das tabelas resultantes, a apresentação das matrizes C (C^1, C^2, \dots, C^n), T (T^1, T^2, \dots, T^n), D e L^2 (L^1, L^2, \dots, L^n), é remetida para anexo, em formato digital num *cd-rom*.

Estradas Romanas

Medidas Topológicas

Arcos = 85

Nós = 83

SubGrafo = 1

Índice gama (γ) = 0.35

Índice alfa (α) = 0.01

Índice de coesão (Cst) = 40.03

Índice do grau de desenv. (Gp) = 41.02

Índice dispersão = 107452

Diâmetro da rede = 42

Índice acessibilidade (D)

D_{\max} = 966 Ad Septem Aras (Campo
Maior)

D_{\min} = 1962 Compleutica (Cova da
Lua)

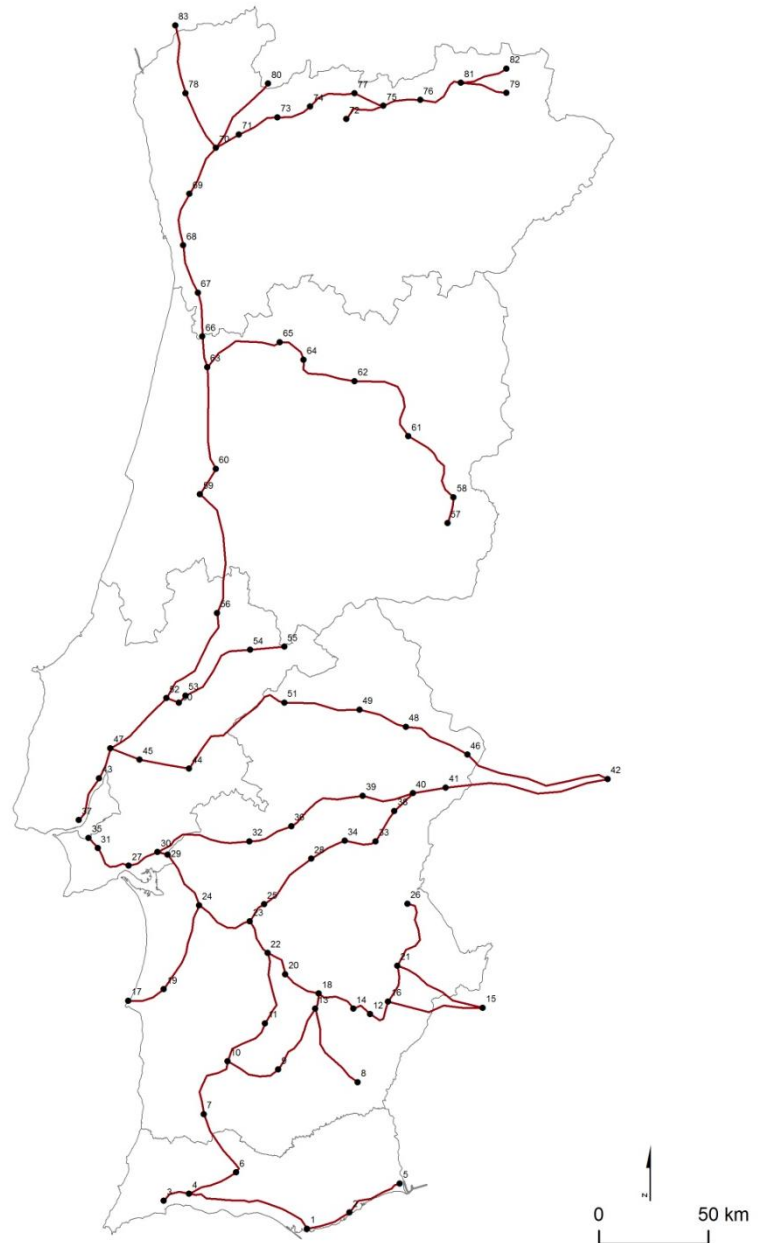


Fig. 33 – Grafo das Estradas Romanas³

³ Mapa extraído de ALARCÃO, Jorge (1974) – Portugal Romano. Vol.33. Lisboa. Historia Mundi. 244pp.

Em que⁴:

| | | |
|------------------------------------|--|------------------------------------|
| 1 Ossonoba (Faro) | 11 Metallum Vispacensis (Aljustrel) | 21 Nova Civitas Aruccitana (Moura) |
| 2 Balsa (Tavira) | 12 Serpa | 22 Odivelas |
| 3 Lacobriga (Lagos) | 13 Santa Clara de Louredo | 23 Torrão |
| 4 Portus Hannibalis (Portimão?) | 14 Quintos | 24 Salacia (Alcacer do Sal) |
| 5 Baesuris (Castro Marim) | 15 Arucci Vetus (Aroche) | 25 Alcaçovas |
| 6 S. Bartolomeu de Messines | 16 Fines (Corte de Messangil) | 26 Lousa |
| 7 Santa Clara-a-Velha | 17 Sines | 27 Caetobriga (Setubal) |
| 8 Myrtilis (Mértola) | 18 Pax Ivlia (Beja) | 28 Ebora (Evora) |
| 9 Castro Verde | 19 Mirobriga (Santiago do Cacem) | 29 Marateca |
| 10 Arandis (Garvão) | 20 Peroguarda | 30 Aguas de Moura |
| 31 Equabona (Coima-a-Velha) | 41 Elvas | 51 Ponte de Sor |
| 32 Montemor-o-Novo | 42 Emerita (Mérida) | 52 Scallabis (Santarém) |
| 33 Redondo | 43 Alverca | 53 Alpiarça |
| 34 S. Miguel de Machede | 44 Coruche | 54 Tubucci (Tramagal) |
| 35 Seixal | 45 Aritium Praetorium | 55 Aritium Vetus (Alvega) |
| 36 Arraiolos | 46 Ad Septem Aras (Campo Maior) | 56 Sellium (Tomar) |
| 37 Lisboa | 47 Arabriga (Alenquer) | 57 Egitania (Idanha-a-Velha) |
| 38 Vila Viçosa | 48 Assumar | 58 Monsanto |
| 39 Estremoz | 49 Abelterium (Alter do Chão) | 59 Conimbriga |
| 40 Terrugem | 50 Almeirim | 60 Aeminium (Coimbra) |
| 61 Centum Cellae | 71 Salatia | 81 Roboretum (Vinhais) |
| 62 Abrunhosa | 72 Beteca (Boticas) | 82 Compleutica (Cova da Lua) |
| 63 Oppidum Vacca (Cabeço do Vouga) | 73 Praesidio | 83 Tude (Tui) |
| 64 Viseu | 74 Vila da Ponte | |
| 65 S. Pedro do Sul | 75 Aquae Flaviae (Chaves) | |
| 66 Talbriga (Branca) | 76 Pinetum | |
| 67 Lancobriga (Fiães da Feira) | 77 Caladunum | |
| 68 Cale (Gaia) | 78 Limia (Ponte de Lima) | |
| 69 Avobriga | 79 Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs) | |
| 70 Bracara (Braga) | 80 Portela do Homem | |

⁴ Os nomes são retirados de ALARCÃO, Jorge (1974) – Portugal Romano. Vol.33. Lisboa. Historia Mundi. 244pp; ALARCÃO, Jorge (1990) coord. - Nova História de Portugal: vol. I: Portugal: das origens à romanização. Lisboa, Editorial Presença.558pp. e de Topónimos Romanos em Portugal [Acedido em 25 de Junho de 2010]. http://pt.wikipedia.org/wiki/Top%C3%B3nimos_romanos_em_Portugal#cite_ref-0.

Apesar da importância que se atribui à Rede de Estradas Romanas na organização espacial de Portugal⁵, a análise da relação existente entre sistema de redes de estradas, estrutura e indicadores de conectividade permite depreender, que se está presente um país com um sistema de rede de estradas desconexo, com uma configuração em espinha ou árvore (sobretudo a Norte do Tejo), típico de um País com um débil nível de desenvolvimento (Garrison, 1960; Garrison e Marble, 1961), conforme atestam os índices de conectividade e coesão (cf. Cap.2; e quadro A, em anexo), e.g. os índices gama ($\gamma = 0.35$) e alfa ($\alpha = 0.01$), que dizem que apenas 35% da rede está conectada, face à máxima conectividade possível.

Esta ilação é fundamentada pelas medidas obtidas nos índices de coesão ($Cst = 40$), grau de desenvolvimento ($Gp = 41$) e diâmetro da rede (42), que apresentam valores fracos. Em síntese, está-se perante uma rede de conectividade e coesão mínimas, com a quase totalidade dos nós a apresentarem apenas um caminho possível a ligá-los, ou seja, com poucos circuitos ou caminhos alternativos a ligar os nós da rede.

Não obstante a interpretação feita, a análise acerca da influência das redes de transportes e comunicação na organização espacial e na relação com o desenvolvimento regional não está completa sem as medidas topológicas de acessibilidade e centralidade (cf. 2.3.2). Com efeito, a partir destas medidas é permitido, não apenas confirmar os resultados das medidas de conectividade acerca da estrutura geral da rede, como também explorar as propriedades das redes pela medição das ligações entre os nós, a saber: hierarquia, núcleo central, periferia, vizinhança, dominância e competição, eficácia e vulnerabilidade da rede.

Assim, para as Estradas Romanas a matriz inicial de conectividade (C^1) (cf. Anexo) permite identificar o grau de conectividade de cada nó e, por conseguinte, estabelecer uma hierarquia da rede (Tabela 8). De salientar contudo, que a matriz de conectividade (C^1) denota sérios limites enquanto medida de acessibilidade, uma vez que apenas representa a existência de ligações directas entre os nós da rede, pelo que o indicador de acessibilidade que daqui se retira só tem em consideração a ligação a 1 arco, ignorando ligações com 2 ou mais arcos, ou seja, ligações indirectas igualmente importantes nas acessibilidades de uma qualquer rede de transportes (cf. Cap. 2).

⁵ “...foram os Romanos com o traçado da rede de vias militares (...) que criaram as linhas gerais do povoamento (...) O sistema das estradas Romanas (...) envolvia duas consequências para o futuro: aquilo a que chamaremos de atlantização do povoamento e a sua unificação por meio de uma linha dorsal no sentido meridiano. Nessa espécie de esqueleto do povoamento, constituída pela rede itinerária (...) a estrada que unia o Algarve à Galiza representava a coluna vertebral.” (Cortesão, 1964:37-39)

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade C ¹ |
|-----------|-------------------------------------|---|
| 1 | Bracara (Braga) | 4 |
| 2 | Portus Hannibalis (Portimão?) | 3 |
| 2 | Arandis (Garvão) | 3 |
| 2 | Santa Clara de Louredo | 3 |
| 2 | Fines (Corte de Messangil) | 3 |
| 2 | Pax Ivlia (Beja) | 3 |
| 2 | Nova Civitas Aruccitana (Moura) | 3 |
| 2 | Odivelas | 3 |
| 2 | Torrão | 3 |
| 2 | Salacia (Alcacer do Sal) | 3 |
| 2 | Aguas de Moura | 3 |
| 2 | Terrugem | 3 |
| 2 | Arabriga (Alenquer) | 3 |
| 2 | Scallabis (Santarem) | 3 |
| 2 | Oppidum Vacca (Cabeço do Vouga) | 3 |
| 2 | Aquae Flaviae (Chaves) | 3 |
| 2 | Roboretum (Vinhais) | 3 |
| 18 | Ossonoba (Faro) | 2 |
| 18 | Balsa (Tavira) | 2 |
| 18 | Viseu | 2 |
| 18 | S. Pedro do Sul | 2 |
| 18 | Talbriga (Branca) | 2 |
| 18 | Lancobriga (Fiães da Feira) | 2 |
| 18 | Cale (Gaia) | 2 |
| 18 | Avobriga | 2 |
| 18 | Salatia | 2 |
| 18 | Praesidio | 2 |
| 18 | Vila da Ponte | 2 |
| 18 | Pinetum | 2 |
| 18 | Caladunum | 2 |
| 18 | Limia (Ponte de Lima) | 2 |
| 32 | Lacobriga (Lagos) | 1 |
| 32 | Baesuris (Castro Marim) | 1 |
| 32 | Myrtilis (Mértola) | 1 |
| 32 | Sines | 1 |
| 32 | Lousa | 1 |
| 32 | Seixal | 1 |
| 32 | Lisboa | 1 |
| 32 | Aritium Vetus (Alvega) | 1 |
| 32 | Egitania (Idanha-a-Velha) | 1 |
| 32 | Beteca (Boticas) | 1 |
| 32 | Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs) | 1 |
| 32 | Portela do Homem | 1 |
| 32 | Compleutica (Cova da Lua) | 1 |
| 32 | Tude (Tui) | 1 |

Tabela 8 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de conectividade C¹ da rede de Estradas Romanas

Num primeiro momento, pode realçar-se quais os nós mais acessíveis e os menos acessíveis que permitem, conjuntamente, com o mapa do grafo georreferenciado, identificar o núcleo central e a periferia do sistema de lugares. Apesar de ser Bracara (Braga), o lugar de maior número de ligações directas (4), ela não constitui o núcleo central da rede, de acordo com a tabela de conectividades da matriz C^1 , uma vez que não existe adjacência com os lugares que sucedem na hierarquia, e.g. Arandis (Garvão), Santa Clara de Louredo, Pax Ivilia (Beja), Nova Civitas Aruccitana (Moura), Odivelas, Torrão e Salacia (Alcacer do Sal), que pela vizinhança e adjacência constituem o núcleo central deste sistema de lugares estruturado pela rede de estradas Romanas.

Em oposição, a periferia deste sistema é caracterizado por um polvilhado de lugares de grau 1, de que sobressaem a Norte: Tude (Tui), Portela do Homem, Compleutica (Cova da Lua) e Civitas zoelarum (Castro de Avelãs); a Oriente: Egitania (Idanha-a-Velha) e Aritium Vetus (Alvega); a Ocidente: Lisboa, Seixal e Sines, e a Sul: Baesuris (Castro Marim) e Lacobriga (Lagos).

Contudo, a matriz C^1 corresponde apenas à matriz inicial, base para cálculo das restantes matrizes, uma vez que é a partir dela que se sabe existirem ou não ligação directa entre quaisquer pares de nós. Para uma mais ‘fina’ avaliação da influência da matriz de conectividade e acessibilidade C e mais desciminada hierarquia dos lugares, tem de se verificar os resultados obtidos aquando do esgotamento da matriz C^n para todas as ligações possíveis, ou seja, para o diâmetro da rede: C^{42} (Tabela 9).

| Ordenação | Lugar | Índice de conectividade C ⁴² |
|---|-------------------------------------|---|
| 1 | Odivelas | 923.05 |
| 2 | Torrão | 860.82 |
| 3 | Pax Iulia (Beja) | 826.92 |
| 4 | Fines (Corte de Messangil) | 739.25 |
| 5 | Peroguarda | 737.55 |
| 6 | Santa Clara de Louredo | 700.66 |
| 7 | Metallum Vispacensis (Aljustrel) | 665.66 |
| 8 | Nova Civitas Aruccitana (Moura) | 659.36 |
| 9 | Arandis (Garvão) | 653.69 |
| 10 | Salacia (Alcacer do Sal) | 649.06 |
| 11 | Arucci Vetus (Aroche) | 579.34 |
| 12 | Quintos | 571.99 |
| 13 | Castro Verde | 564.27 |
| 14 | Serpa | 541.39 |
| 15 | Alcáçovas | 451.32 |
| 16 | Marateca | 406.22 |
| 17 | Santa Clara-a-Velha | 361.64 |
| 18 | Mirobriga (Santiago do Cacem) | 335.48 |
| 19 | Águas de Moura | 299.20 |
| 20 | Myrtilis (Mértola) | 289.66 |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> | | |
| 63 | Alpiarça | 16.44 |
| 64 | Ad Septem Aras (Campo Maior) | 15.64 |
| 65 | Tude (Tui) | 15.60 |
| 66 | Baesuris (Castro Marim) | 15.37 |
| 67 | Caladunum | 12.23 |
| 68 | Ponte de Sor | 12.19 |
| 69 | Aquae Flaviae (Chaves) | 11.91 |
| 70 | Viseu | 11.16 |
| 71 | Assumar | 10.94 |
| 72 | Lisboa | 10.90 |
| 73 | Abelterium (Alter do Chão) | 10.38 |
| 74 | Tubucci (Tramagal) | 9.32 |
| 75 | Pinetum | 7.44 |
| 76 | Abrunhosa | 6.58 |
| 77 | Roboretum (Vinhais) | 5.95 |
| 78 | Beteca (Boticas) | 4.92 |
| 79 | Aritium Vetus (Alvega) | 4.09 |
| 80 | Centum Cellae | 4.02 |
| 81 | Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs) | 2.52 |
| 82 | Compleutica (Cova da Lua) | 2.52 |
| 83 | Monsanto | 2.19 |
| 84 | Egitania (Idanha-a-Velha) | 1.00 |

Tabela 9⁶ – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de conectividade C⁴² da rede de Estradas Romanas.

⁶ Os valores foram ponderados pelo valor mínimo obtido pela matriz.

Com efeito, da leitura da tabela 9 pode constatar-se que existe uma maior discriminação da hierarquia dos lugares e a permanência espacial do núcleo central e da periferia, ainda que os lugares tenham mudado de posição na ordenação (ex: Odivelas e Torrão que passam da posição 2 para a posição de topo na hierarquia de lugares com maior conectividade). Note-se ainda para o que em cima se designou de mais ‘fina’ análise da rede e que redundou na saída de Bracara (Braga) dos 20 lugares de maior conectividade, quando era o mais conexo na matriz C^1 , o que é resultado da melhor capacidade de hierarquização do método, pois como se tinha referido, a matriz C^1 não atribui importância às ligações indirectas entre os nós, facto que leva a que a medida de conectividade que dela se retira seja considerada um fraco discriminador da hierarquia da rede (Taaffe e Gauthier, 1973:120). Para o refinamento desta medida, e para que nela se passe a integrar, quer as ligações directas, quer as indirectas, é preciso recorrer-se a outras matrizes, nomeadamente à matriz T e à matriz D (cf. Anexo).

Derivada da multiplicação das matrizes C, a matriz T^{42} já permite obter um indicador de acessibilidade que integre não apenas as ligações directas, mas também indique o número de caminhos possíveis para se ir de um nó a qualquer outro nó da rede. A medida de acessibilidade é obtida pelo somatório das linhas da matriz, sendo que quanto maior o valor, maior é a acessibilidade do nó (Tabela 10). Tal como se fez referência em 2.3.2 (Medidas de acessibilidade), o poder discriminador da matriz T é tanto maior quanto maior a complexidade da rede, isto é, o número de arcos e de nós.

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade T ⁴² |
|---|-------------------------------------|--|
| 1 | Odivelas | 2990.21 |
| 2 | Torrão | 2754.74 |
| 3 | Pax Ivlia (Beja) | 2669.10 |
| 4 | Fines (Corte de Messangil) | 2375.80 |
| 5 | Peroguarda | 2364.56 |
| 6 | Santa Clara de Louredo | 2252.69 |
| 7 | Metallum Vispacensis (Aljustrel) | 2133.49 |
| 8 | Nova Civitas Aruccitana (Moura) | 2120.54 |
| 9 | Arandis (Garvão) | 2111.89 |
| 10 | Salacia (Alcacer do Sal) | 2108.97 |
| 11 | Arucci Vetus (Aroche) | 1863.10 |
| 12 | Quintos | 1836.54 |
| 13 | Castro Verde | 1814.67 |
| 14 | Serpa | 1743.61 |
| 15 | Alcáçovas | 1465.16 |
| 16 | Marateca | 1298.73 |
| 17 | Santa Clara-a-Velha | 1160.25 |
| 18 | Mirobriga (Santiago do Cacem) | 1072.63 |
| 19 | Águas de Moura | 975.09 |
| 20 | Myrtilis (Mértola) | 933.52 |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> | | |
| 63 | Alpiarça | 56.20 |
| 64 | Tude (Tui) | 54.74 |
| 65 | Ad Septem Aras (Campo Maior) | 51.01 |
| 66 | Baesuris (Castro Marim) | 49.75 |
| 67 | Caladunum | 42.78 |
| 68 | Ponte de Sor | 41.52 |
| 69 | Aquae Flaviae (Chaves) | 39.59 |
| 70 | Viseu | 37.59 |
| 71 | Lisboa | 36.87 |
| 72 | Assumar | 36.59 |
| 73 | Abelterium (Alter do Chão) | 34.55 |
| 74 | Tubucci (Tramagal) | 31.53 |
| 75 | Pinetum | 25.92 |
| 76 | Abrunhosa | 22.57 |
| 77 | Roboretum (Vinhais) | 19.96 |
| 78 | Beteca (Boticas) | 17.16 |
| 79 | Aritium Vetus (Alvega) | 13.98 |
| 80 | Centum Cellae | 13.57 |
| 81 | Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs) | 8.76 |
| 82 | Compleutica (Cova da Lua) | 8.76 |
| 83 | Monsanto | 7.50 |
| 84 | Egitania (Idanha-a-Velha) | 3.38 |

Tabela 10⁷ – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidades T⁴² da rede de Estradas Romanas.

⁷ Os valores foram ponderados por 10¹³

Efectivamente, com as matrizes de acessibilidades T^i já é possível dispor de uma maior capacidade hierarquizante, não obstante os 20 primeiros lugares mais acessíveis não terem sofrido quaisquer mudanças de posição na ordenação. As alterações começam a verificar-se apenas depois e prosseguem até aos lugares com valores de acessibilidade mais baixos da tabela 10. Todavia, devido à simplicidade da rede, com uma estrutura em árvore, a diferença entre as matrizes C^{42} e T^{42} é diminuta no que toca à hierarquia dos lugares, sendo que para obtenção de um padrão mais representativo da hierarquia, é necessário eliminar algumas redundâncias. Assim, melhor do que saber o número de ligações possíveis entre quaisquer pares de nós, é saber qual o melhor caminho entre todos os nós em função do número de ligações (Shimbel, 1953:501), ou seja, a medida de acessibilidade de um nó relativamente à rede. Para tal é preciso efectuar-se o cálculo da matriz D ou matriz de distâncias topológicas de Shimbel (cf. Cap. 2).

Nestas matrizes, tal como nas matrizes C^i e T^i , é da soma das linhas que se vai obter a medida de acessibilidade, que no caso da matriz D significa que a acessibilidade do nó na rede é tanto maior, quanto mais baixo for o valor obtido. Ou seja, quanto menor for o número das ligações (arcos) para ligar quaisquer pares de nós da rede, maior será a acessibilidade desse nó na rede (Tabela 11).

Na consequência do refinamento da medida de acessibilidade, uma nova hierarquia da rede de lugares é determinada (Tabela 11), com reflexo na organização espacial por deslocação dos centros e das periferias.

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade D |
|---|-------------------------------------|----------------------------|
| 1 | Ad Septem Aras (Campo Maior) | 966 |
| 2 | Emerita (Mérida) | 967 |
| 2 | Assumar | 967 |
| 4 | Elvas | 970 |
| 4 | Abelterium (Alter do Chão) | 970 |
| 6 | Terrugem | 975 |
| 6 | Ponte de Sor | 975 |
| 8 | Coruche | 982 |
| 9 | Aritium Praetorium | 991 |
| 10 | Vila Viçosa | 1001 |
| 11 | Arabriga (Alenquer) | 1002 |
| 12 | Estremoz | 1014 |
| 13 | Scallabis (Santarém) | 1019 |
| 14 | Redondo | 1025 |
| 15 | Arraiolos | 1032 |
| 16 | S. Miguel de Machede | 1046 |
| 17 | Sellium (Tomar) | 1046 |
| 18 | Montemor-o-Novo | 1050 |
| 19 | Ebora (Evora) | 1064 |
| 20 | Águas de Moura | 1068 |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> | | |
| 65 | Fines (Corte de Messangil) | 1477 |
| 66 | Monsanto | 1514 |
| 67 | Praesidio | 1522 |
| 68 | Ossonoba (Faro) | 1546 |
| 69 | Lacobriga (Lagos) | 1550 |
| 70 | Tude (Tui) | 1554 |
| 71 | Nova Civitas Aruccitana (Moura) | 1555 |
| 72 | Arucci Vetus (Aroche) | 1556 |
| 73 | Vila da Ponte | 1589 |
| 74 | Egitania (Idanha-a-Velha) | 1595 |
| 75 | Balsa (Tavira) | 1625 |
| 76 | Lousa | 1636 |
| 77 | Caladunum | 1658 |
| 78 | Baesuris (Castro Marim) | 1706 |
| 79 | Aquae Flaviae (Chaves) | 1729 |
| 80 | Pinetum | 1804 |
| 81 | Beteca (Boticas) | 1810 |
| 82 | Roboretum (Vinhais) | 1881 |
| 83 | Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs) | 1962 |
| 84 | Compleutica (Cova da Lua) | 1962 |
| 34 | Lisboa | 1162 |

Tabela 11 – Hierarquia da rede de Lugares, a partir da Matriz de acessibilidades D da rede de Estradas Romanas.

Ao compararem-se a ordenação do quadro com as hierarquias de lugares (Tabela 12, abaixo), constata-se que as medidas de acessibilidade determinadas, quer pela matriz C, quer pela matriz T, revelam uma hierarquia dos lugares muito semelhantes, com o núcleo central e a periferia a permanecerem quase imutáveis nas respectivas hierarquias. Contudo, esta hierarquia da rede sofre fortes alterações quando comparada com a ordenação determinado a partir dos índices de Shimbel (matriz D).

Enquanto nas matrizes C^{42} e T^{42} , Odivelas, Torrão, Pax Ivlia, Fines, ... compõem o núcleo central, pois são matrizes que privilegiam apenas as ligações directas e todas as ligações, respectivamente, na matriz D o núcleo central passa a ser composto por Ad Septem Aras (Campo Maior), Emerita (Mérida), Assumar, ... (Figura 33). Aliás, uma análise mais fina permite verificar que somente um lugar (Águas de Moura), dos 20 mais acessíveis segundo as matrizes C^i e T^i , tem lugar entre os 20 mais acessíveis da matriz D, ou ainda que dos 10 lugares mais acessíveis na ordenação da matriz D, nenhum figura entre os primeiros 20 lugares, quer da ordenação da matriz C^i , quer na ordenação da matriz T^i (Tabela 12), o que permite afirmar que as redundâncias foram completamente eliminadas da matriz

Relativamente aos lugares que formam a extrema periferia da rede, quanto à sua acessibilidade, o cenário é diferente. Existe uma mesma similitude das hierarquias das matrizes C^{42} e T^{42} , e.g. Egitania (Idanha-a-Velha), Monsanto, Compleutica (Cova da Lua), Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs), Centum Cellae, Aritium Vetus (Alvega), ... permanecem imutáveis entre os menos acessíveis; contudo, na ordenação da matriz D, a situação não é a mesma que se analisou para os lugares que compõem o núcleo central. Precisamente, existem lugares entre os 10 menos acessíveis da matriz D, que podem igualmente encontrar-se nas matrizes C^{42} e T^{42} , e.g. Roboretum (Vinhais), Beteca (Boticas), Pinetum, Aquae Flaviae (Chaves), Baesuris (Castro Marim) e Caladunum, que estando na base dos menos acessíveis da ordenação da matriz D, apesar de não serem os últimos nas matrizes C^{42} e T^{42} , encontram-se entre os 20 menos acessíveis. De uma perspectiva espacial, devido à simplicidade da estrutura da rede, as mudanças não são acentuadas. Contudo, a realidade analisada pelo método da matriz D, permite verificar uma perspectiva diferente, a saber: existe uma evidente mudança do núcleo central mais para norte e interior do território.

| Lugar | Ordenação C ⁴² | Ordenação T ⁴² | Ordenação D |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| Ad Septem Aras (Campo Maior) | 65 | 65 | 1 |
| Emerita (Mérida) | 52 | 55 | 2 |
| Assumar | 70 | 71 | 3 |
| Elvas | 40 | 41 | 4 |
| Abelterium (Alter do Chão) | 72 | 72 | 5 |
| Terrugem | 31 | 32 | 6 |
| Ponte de Sor | 67 | 67 | 7 |
| Coruche | 60 | 60 | 8 |
| Aritium Praetorium | 51 | 51 | 9 |
| Vila Viçosa | 35 | 35 | 10 |
| Odivelas | 1 | 1 | 30 |
| Torrão | 2 | 2 | 25 |
| Pax Iulia (Beja) | 3 | 3 | 43 |
| Fines (Corte de Messangil) | 4 | 4 | 64 |
| Peroguarda | 5 | 5 | 37 |
| Santa Clara de Louredo | 6 | 6 | 49 |
| Metallum Vispacensis (Aljustrel) | 7 | 7 | 35 |
| Nova Civitas Aruccitana (Moura) | 8 | 8 | 70 |
| Arandis (Garvão) | 9 | 9 | 42 |
| Salacia (Alcacer do Sal) | 10 | 10 | 28 |
| Egitania (Idanha-a-Velha) | 83 | 83 | 73 |
| Balsa (Tavira) | 44 | 44 | 74 |
| Lousa | 21 | 21 | 75 |
| Caladunum | 66 | 66 | 76 |
| Baesuris (Castro Marim) | 65 | 65 | 77 |
| Aquae Flaviae (Chaves) | 68 | 68 | 78 |
| Pinetum | 74 | 74 | 79 |
| Beteca (Boticas) | 77 | 77 | 80 |
| Roboretum (Vinhais) | 76 | 76 | 81 |
| Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs) | 80 | 80 | 82 |
| Compleutica (Cova da Lua) | 81 | 81 | 83 |

Tabela 12⁸ – Comparação das hierarquias da rede de lugares, obtidas a partir das Matrizes C⁴², T⁴² e D da rede de Estradas Romanas.

⁸ Azul: os 10 lugares mais e menos acessíveis da matriz D; Verde: os 10 lugares mais acessíveis das matrizes C⁴² e T⁴².

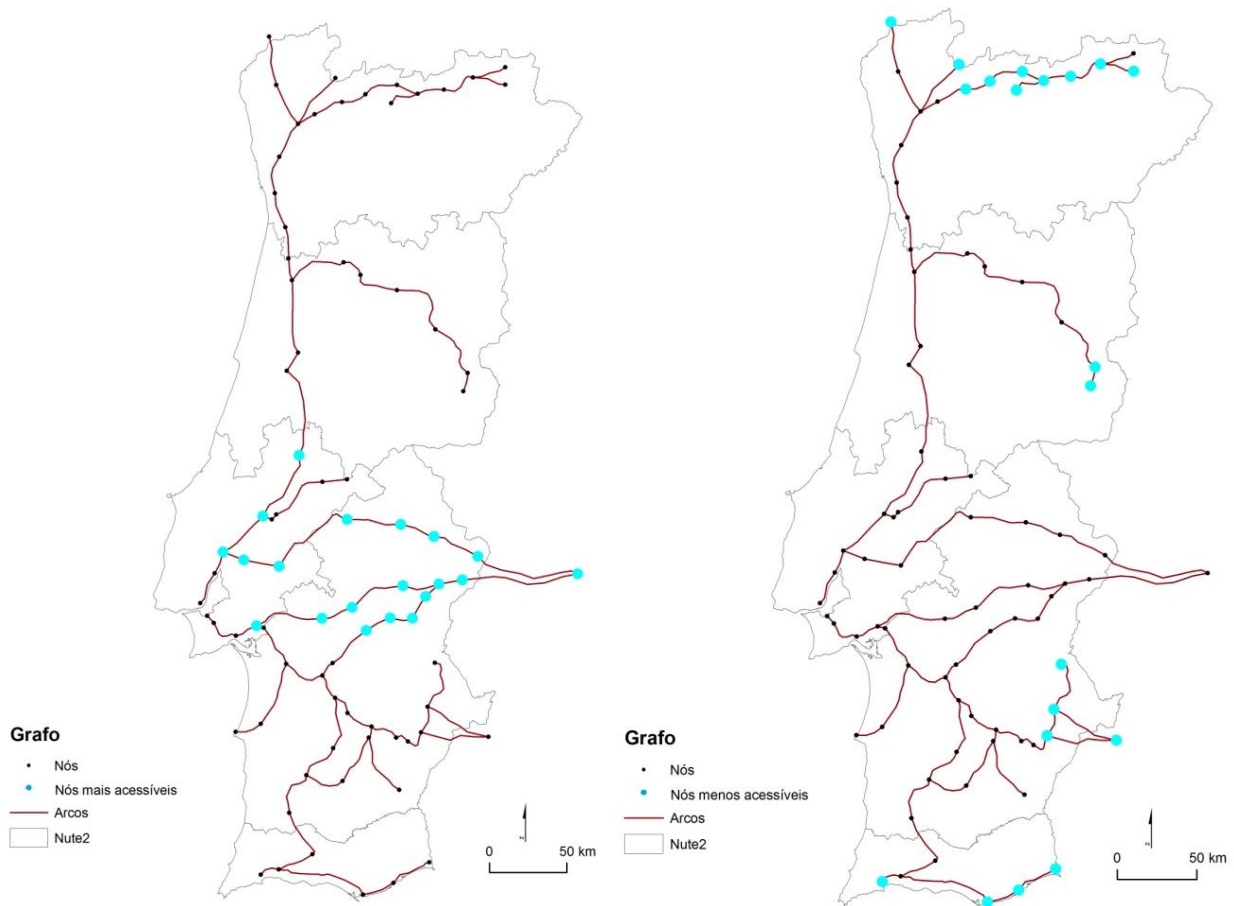


Fig. 34 - Grafo da Rede de Estradas Romanas com identificação dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis da rede calculados a partir da matriz D.

Em síntese, e após se ter analisado os resultados das medidas de conectividade e das medidas de acessibilidade e centralidade, que descrevem a rede de Estradas Romanas pode afirmar-se que a rede denota um fraco grau de coesão e fortes assimetrias espaciais, no que respeita à sua organização no território, mais concentrada Norte/Sul e, conseqüentemente, onde se encontram os lugares com maiores índices de centralidade.

No que respeita aos índices de acessibilidade, a dicotomia Litoral vs Interior não se faz sentir, apesar de existir uma ocupação da rede preferencialmente ao longo do Litoral. Tal deve-se ao facto de a rede apresentar uma estrutura simples e em árvore. O que se manifesta é uma dicotomia entre a geografia e a topologia, o que segundo Taaffe, Morrill e Gould (1963), e com base nos índices resultantes, significa tratar-se de um País pouco desenvolvido e com fraco poder económico, por denotar uma estrutura pouco densa da rede de transportes, de

fraca conectividade e complexidade e com um sistema urbano com desigual ocupação territorial.

Contudo, as medidas de conectividade e de acessibilidade não exprimem toda a dimensão da dinâmica das redes e sua relação com o território. De forma a medir essa relação, confrontam-se e analisam-se os resultados das medidas topológicas com outros derivados das medidas de distribuição espacial compostas pelo cálculo da medida central e da elipse do desvio padrão.

A medida central é uma função determinada a partir do somatório das distâncias euclidianas (D_e) entre um objecto e todos os outros objectos espaciais. Quanto menor o seu valor, mais central a localização dos objectos no espaço geográfico. Formalmente, a função traduz-se por:

$$D_e(A, B) = \sqrt{\frac{\sum (x - x_1)^2 + \sum (y - y_1)^2}{n}},$$

em que A e B correspondem aos objectos, aqui medidos pela distância que os separa através do seu referencial geográfico, ou seja, as suas coordenadas geográficas ou cartesianas ($x - x_1$) e ($y - y_1$), enquanto n representa o número de objectos existentes, que no caso em estudo são os lugares da rede.

$$Cx = \frac{\sum (xi)}{n} \qquad Cy = \frac{\sum (yi)}{n}$$

Quanto à elipse do desvio padrão (SDE)⁹, esta mede e representa a existência ou não de uma tendência de distribuição espacial em torno do objecto central e para uma estrutura de objectos. Formalmente:

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \qquad SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}},$$

sendo x_i e y_i as coordenadas dos nós i , $\{\bar{X}, \bar{Y}\}$ representa o Centro Médio dos nós, e n corresponde ao número total de nós.

⁹ (Standard Deviation Ellipse) in Mitchell, Andy. The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2. ESRI Press, 2005.

Por sua vez, o ângulo de rotação da elipse é calculado de acordo com:

$$\begin{aligned}\tan \theta &= \frac{A + B}{C} \\ A &= \left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \right) \\ B &= \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \right)^2} \\ C &= 2 \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i\end{aligned}$$

sendo:

\tilde{x}_i e \tilde{y}_i os desvios das coordenadas xy em relação ao Centro Médio.

Os desvios padrão em torno do eixo x e em torno do eixo y são calculados pelas expressões:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \cos \theta - \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{n}} \\ \sigma_y &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \sin \theta + \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{n}}\end{aligned}$$

Para análise das Estradas Romanas, estas medidas territoriais foram calculadas, quer para a estrutura de nós da rede de estradas, quer para a estrutura de pontos formados pelo conjunto de cidades existentes no ano de 1100 (Figura 35), com o intuito de encontrar padrões de similitude ou dissimilitude espacial. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos estrutura-se a análise em três partes: primeiro, a análise dos resultados obtidos a partir dos nós da rede de estradas; depois dos resultados obtidos a partir da rede de cidades; e finalmente, uma análise comparativa entre resultados. Esta será de resto a metodologia seguida para as redes de estradas de outros períodos.

Com o apoio visual providenciado pelos SIG e devido à possibilidade de georreferenciação, é fácil identificar, segundo o cálculo da medida central aos nós da rede de estradas, Ponte de Sôr como o lugar mais central face a todos os outros lugares da rede. No entanto, se considerarmos a estrutura do sistema de cidades existentes no ano de 1100, constatamos que existe uma mudança da centralidade para Norte, com Coimbra a afirmar-se como a cidade mais central. Tais resultados vão ter obviamente implicações sobre a tendência que se configura quanto à organização e configuração do território.

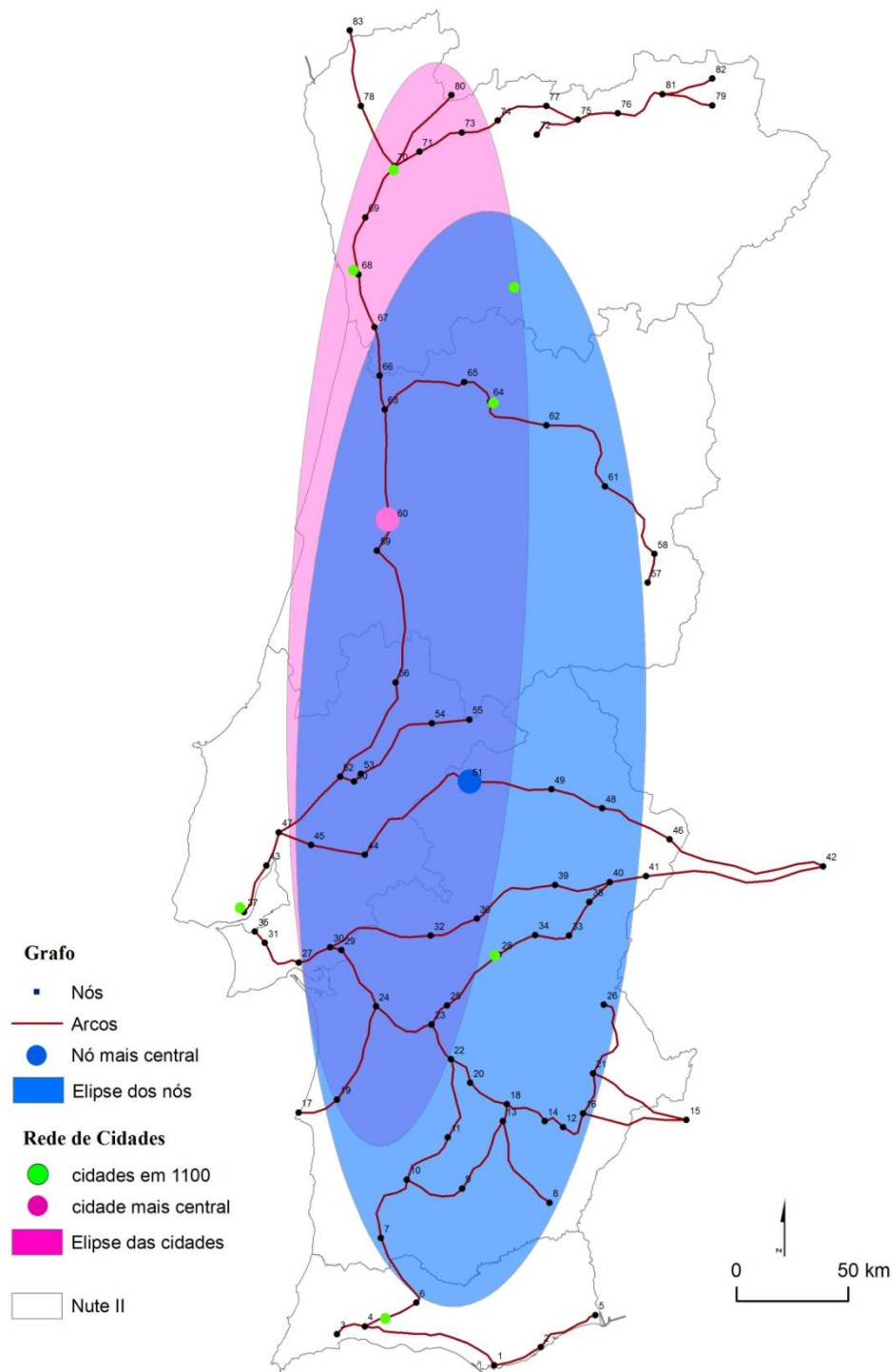


Fig. 35 - Grafo das Vias Romanas com a rede de cidades existentes em 1100, e as medidas de distribuição espacial

De acordo com as elipses do desvio, o que se constata é uma mudança (‘esticar e alongar’) dos eixos (x e y) da rede de cidades. Efectivamente, se no caso da rede de nós

(lugares) das estradas, a elipse apresenta-se maior (em ambos os eixos) e focada no Sul do País, já no caso da rede de cidades (cor rosa), a perspectiva da realidade sofre mudanças. Com efeito, a elipse ‘sobe’ (para lá do Gerês) e ‘estende-se-se’ ao longo do Litoral e para Sul, até Sines, enfatizando a importância estrutural da estrada que vem do Norte até Lisboa, ao longo do Litoral.

Confrontando os resultados, duas notas sobressaem:

- O facto de, as medidas de distribuição espacial reforçarem os resultados obtidos pelas medidas topológicas, quando aplicadas aos nós da rede de estradas;
- A tendência que se começa a desenhar no território, de uma litoralização do sistema urbano nacional e que, passados mil anos continua a persistir. (cf. PRN 2000).

Seguindo a mesma metodologia delineada para as Estradas Romanas, avança-se agora para a análise das medidas topológicas para a Rede de Itinerários de 1800, que antecede o período do Fontismo (Figura 36), e que antecedeu aquela que foi a primeira Lei¹⁰ sobre a moderna rede de estradas (Alegria, 1990:104). Este salto temporal para a análise da rede de estradas prende-se sobretudo com o facto deste intervalo ser identificado por um imobilismo na renovação de uma estrutura viária por caminhos e calçadas e que perdurou até à segunda metade do século XIX (Silveira, 1994:29).

É desta primeira Lei sobre a rede de estradas de Portugal e da reclassificação das estradas que se introduziu pela primeira vez a designação de itinerário principal. De resto, em traços gerais, o sistema de classificação baseava-se em:

- Estradas nacionais de 1ª classe;
- Estradas nacionais de 2ª classe;
- Estradas nacionais de 3ª classe;
- Estradas municipais;
- Caminhos públicos, Municipais e Vicinais (artº1 do Decreto-lei34:593 de 1945).

¹⁰ Decreto-lei nº34:593. Plano rodoviário. Classificação das estradas nacionais e municipais e dos caminhos públicos e fixação das respectivas características técnicas.

As estradas nacionais de 1ª classe, que fazem a ligação entre os principais centros e entre estes e os portos ou a fronteira, constituem os itinerários principais, enquanto as estradas nacionais de 2ª classe que estabelecem a ligação dos principais centros de cada distrito e destes com as estradas de 1ª classe, completam a rede fundamental. Para esta dissertação, e dado que a Rede estruturada segundo esta Lei nunca se verificou no território, fez-se uso da Rede de Itinerários de 1800¹¹ (cf. Figura 36).

Para a Rede viária de 1800

Medidas Topológicas

Arcos = 390

Nós = 244

SubGrafo = 1

Índice gama (γ) = 0.53

Índice alfa (α) = 0.30

Índice de coesão (Cst) = 76.0

Índice do grau de desenv. (Gp) = 193.8

Índice dispersão = 690474

Diâmetro da rede = 31

Índice acessibilidade (D)

D_{\max} = 422 (Madalena, nó 142)

D_{\min} = 4432 (Melgaço, nó 244)

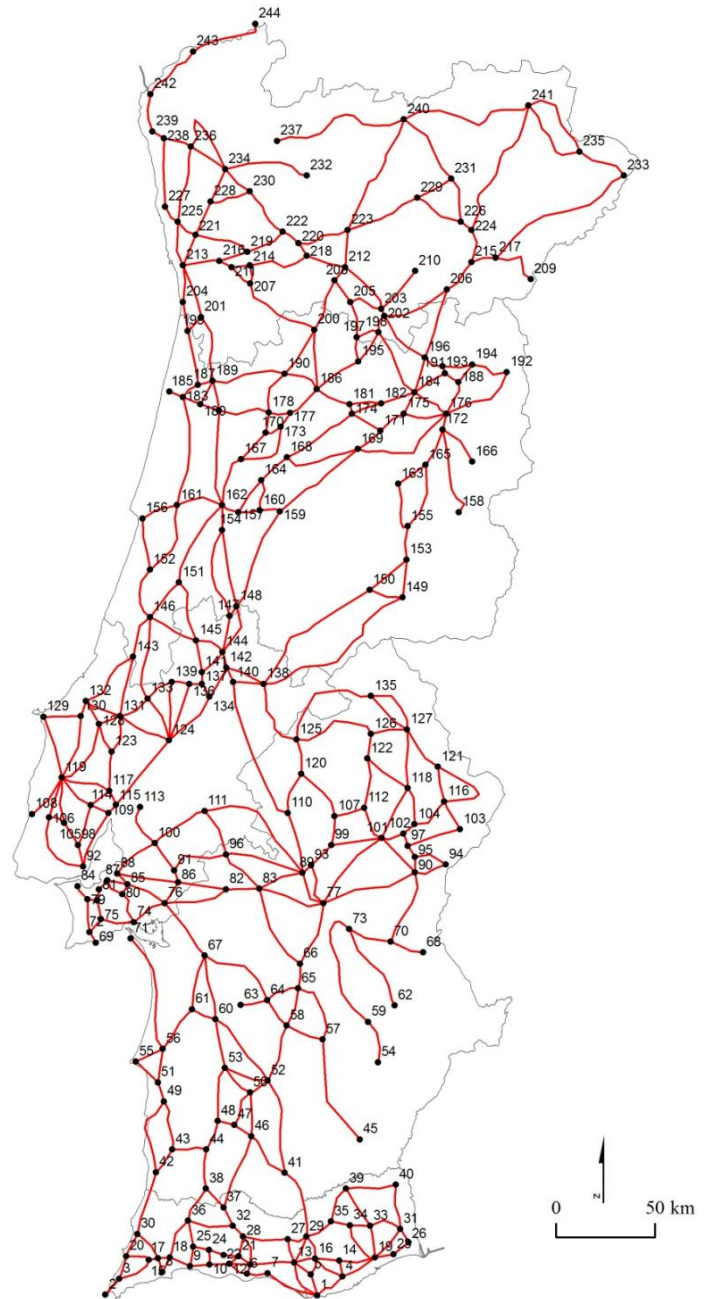


Fig. 36 – Grafo da Rede de Itinerários de Portugal continental em 1800.

¹¹ Base cartográfica extraída de Matos, Artur Teodoro (1980). Transportes e comunicação em Portugal, Açores e Madeira (1750-1850). Ponta Delgada, Universidade dos Açores. 650pp.

Em que:

| | | | | | |
|-----|-----------------------|-----|----------------------|-----|----------------------------|
| 1 | Faro | 11 | Lagoa | 21 | Estômbar |
| 2 | Sagres | 12 | Ferragudo | 22 | Silves-Estômbar |
| 3 | Vila do Bispo | 13 | Loulé | 23 | Vila Real de Santo António |
| 4 | Olhão | 14 | São Brás de Alportel | 24 | Silves |
| 5 | Conceição | 15 | Budens | 25 | Monte Judeu |
| 6 | Albufeira | 16 | Estói | 26 | Castro Marim |
| 7 | Quarteira | 17 | Espiche | 27 | Benafim |
| 8 | Lagos | 18 | Odiáxere | 28 | São Batelomeu de Messines |
| 9 | Portimão | 19 | Tavira | 29 | São Brás de Alportel |
| 10 | Alvor | 20 | Pedralva | 30 | Carrapateira |
| 31 | Odeleite | 41 | Ameixial | 51 | Odemira |
| 32 | Messines de Baixo | 42 | Aljezur | 52 | Castro Verde |
| 33 | Estrada | 43 | Zambujeira de Baixo | 53 | Casével |
| 34 | Cabaços | 44 | Foz do Farelo | 54 | Vales Mortos |
| 35 | Umbrias de Baixo | 45 | Mértola | 55 | Sines |
| 36 | Montes de Cima | 46 | Almodôvar | 56 | Santiago do Cacém |
| 37 | Odelouca | 47 | Gomes Aires | 57 | Beja |
| 38 | Monchique | 48 | Santana da Serra | 58 | Ferreira do Alentejo |
| 39 | Zambujal | 49 | Odeceixe | 59 | Serpa |
| 40 | Alcoutim | 50 | Ourique | 60 | Santa Margarida do Sado |
| 61 | Grândola | 71 | Tróia | 81 | Barreiro |
| 62 | Moura | 72 | Quinta do Conde | 82 | Vendas Novas |
| 63 | Ermidas-Sado | 73 | São Manços | 83 | Montemor-o-Novo |
| 64 | Canhestros | 74 | Setúbal | 84 | Almada |
| 65 | Cuba | 75 | Palmela | 85 | Sarilhos Grandes |
| 66 | Alvito | 76 | Marateca | 86 | Santo Isidro de Pegões |
| 67 | Alcácer do Sal | 77 | Évora | 87 | Moita |
| 68 | Mourão | 78 | Amora | 88 | Montijo |
| 69 | Sesimbra | 79 | Seixal | 89 | Arraiolos |
| 70 | Reguengos de Monsaraz | 80 | Pinhal Novo | 90 | Redondo |
| 91 | Canha | 101 | Estremoz | 111 | Mora |
| 92 | Lisboa | 102 | Borba | 112 | Fronteira |
| 93 | Évora Monte | 103 | Elvas | 113 | Benavente |
| 94 | Olivença | 104 | Santo Aleixo | 114 | Bucelas |
| 95 | Alandroal | 105 | Mafra | 115 | Vila Franca de Xira |
| 96 | Santana do Mato | 106 | Sintra | 116 | Campo Maior |
| 97 | Vila Viçosa | 107 | Sousel | 117 | Arruda dos Vinhos |
| 98 | Amadora | 108 | Ericeira | 118 | Santa Eulália |
| 99 | Vimieiro | 109 | Póvoa de Santa Iria | 119 | Torres Vedras |
| 100 | Coruche | 110 | Pavia | 120 | Avis |
| 121 | Arronches | 131 | Rio Maior | 141 | Paço |
| 122 | Monforte | 132 | Caldas | 142 | Madalena |
| 123 | Alenquer | 133 | Alcanena | 143 | Alcobaça |
| 124 | Santarém | 134 | Entroncamento | 144 | Tomar |

| | | |
|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 125 Ponte de Sôr | 135 Nisa | 145 Fátima |
| 126 Crato | 136 Torres Novas | 146 Leiria |
| 127 Portalegre | 137 Chancelaria | 147 Alvaiázere |
| 128 Bombarral | 138 Abrantes | 148 Ansião |
| 129 Peniche | 139 Zibreira | 149 Castelo Branco |
| 130 Óbidos | 140 Asseiceira | 150 Pampilhosa da Serra |
| 151 Pombal | 161 Montemor-o-Velho | 171 Seia |
| 152 Louriça | 162 Coimbra | 172 Santana da Azinha |
| 153 Idanha-a-Nova | 163 Covilhã | 173 Mortágua |
| 154 Miranda do Corvo | 164 Penacova | 174 Nelas |
| 155 Fundão | 165 Belmonte | 175 Gouveia |
| 156 Figueira da Foz | 166 Sabugal | 176 Guarda |
| 157 Miranda do Corvo | 167 Mealhada | 177 Tondela |
| 158 Penamacor | 168 Santa Comba Dão | 178 Mosteirinho |
| 159 Arganil | 169 Oliveira do Hospital | 179 Águeda |
| 160 Vila Nova de Poiares | 170 Anadia | 180 Requeixo |
| 181 Mangualde | 191 Vila Franca das Naves | 201 São João da Madeira |
| 182 Fornos de Algodres | 192 Almeida | 202 Mondim da Beira |
| 183 Aveiro | 193 Trancoso | 203 Paçô |
| 184 Celorico da Beira | 194 Pinhel | 204 Espinho |
| 185 Gafanha da Nazaré | 195 Satão | 205 Tarouca |
| 186 Viseu | 196 Aguiar da Beira | 206 Tabuaço |
| 187 Albergaria-a-Velha | 197 Vila Nova de Paiva | 207 Castelo de Paiva |
| 188 Cova | 198 Lamas | 208 Castro Daire |
| 189 Sever do Vouga | 199 Ovar | 209 Freixo de Espada à Cinta |
| 190 Vouzela | 200 São Pedro do Sul | 210 São João da Pesqueira |
| 211 Gondomar | 221 Trofa | 231 Mirandela |
| 212 Lamego | 222 Felgueiras | 232 Cabeceiras de Basto |
| 213 Porto | 223 Vila Real | 233 Miranda do Douro |
| 214 Marco de Canavezes | 224 Alfândega da Fé | 234 Braga |
| 215 Vila Nova de Foz Côa | 225 Vila do Conde | 235 Vimioso |
| 216 Valongo | 226 Vila Flor | 236 Ponte de Lima |
| 217 Torre de Moncorvo | 227 Póvoa de Varzim | 237 Vieira do Minho |
| 218 Baião | 228 Vila Nova de Famalicão | 238 Barcelos |
| 219 Penafiel | 229 Murça | 239 Viana do Castelo |
| 220 Amarante | 230 Guimarães | 240 Chaves |
| 241 Bragança | | |
| 242 Caminha | | |
| 243 Valença | | |
| 244 Melgaço | | |

Depois da estrutura ‘litoralizada’ das Estradas Romanas, o território aparece, agora, à luz do sistema da rede de estradas do final do séc. XIX, mais equilibrado, com os itinerários a cobrirem bastante uniformemente o território.

Segundo as medidas de conectividade, a rede de estradas em Portugal continental no ano de 1800 indicava um País ainda pouco desenvolvido, mas que face à estrutura viária romana denota já um processo de renovação e desenvolvimento, conforme provam as subidas significativas, nos índices gama (γ) e alfa (α).

O aumento das componentes do grafo, isto é, dos nós e sobretudo dos arcos, evidencia uma dinâmica, que por si pouco significa, mas que combinada com a distribuição espacial e os valores de (γ) e (α) traduz-se numa estrutura mais complexa e numa rede mais densa que o formalismo do modelo baseado nas medidas de conectividade vai confirmar, ao assinalar a criação de vários circuitos, ou seja, de caminhos alternativos para deslocações entre nós. O índice alfa ($\alpha = 0.30$) dá os primeiros, ainda que incipientes, sintomas, e o índice gama ($\gamma=0.53$), complementado pelos índices de coesão ($Cst = 76.0$) e grau de desenvolvimento ($Gp = 193.8$), sublinham tratar-se de uma rede que embora não seja de conectividade máxima, é uma rede mais desenvolvida, conforme prova a diminuição do diâmetro da rede. Trata-se, do ponto de vista da estrutura da rede, de uma rede em malha (cf. Cap. 2).

Efectivamente, enquanto na rede de Estradas Romanas apenas 35% da rede estava conectada, na rede de estradas de 1800, a conectividade subiu para 53%, conforme prova o índice gama (γ). Estes primeiros indicadores dão já indicação de um aumento da complexidade na organização espacial da rede. Contudo devem ser reforçados com a leitura e a análise dos resultados das medidas de acessibilidade e centralidade.

Segundo a matriz inicial de conectividade (D), é possível analisar-se a hierarquia da rede de lugares, medida a partir dos nós da rede de itinerários (Tabela 13).

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade D |
|---|----------------------------|----------------------------|
| 1 | Madalena | 1916 |
| 2 | Asseiceira | 1929 |
| 3 | Pavia | 1947 |
| 4 | Tomar | 1958 |
| 5 | Arraiolos | 1975 |
| 6 | Abrantes | 2017 |
| 7 | Ansião | 2022 |
| 8 | Montemor-o-Novo | 2035 |
| 9 | Évora | 2043 |
| 10 | Fátima | 2056 |
| 11 | Alvaiázere | 2061 |
| 12 | Entroncamento | 2104 |
| 13 | Paço | 2121 |
| 14 | Ponte de Sôr | 2128 |
| 15 | Santana do Mato | 2130 |
| 16 | Alvito | 2139 |
| 17 | Évora Monte | 2142 |
| 18 | Miranda do Corvo | 2143 |
| 19 | Pombal | 2144 |
| 20 | Avis | 2158 |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> | | |
| 225 | Alvor | 3610 |
| 226 | Silves-Estômbar | 3630 |
| 227 | Cabeceiras de Basto | 3634 |
| 228 | Espiche | 3638 |
| 229 | Vimioso | 3704 |
| 230 | Odeleite | 3708 |
| 231 | Pedralva | 3709 |
| 232 | Vila Real de Santo António | 3712 |
| 232 | Viana do Castelo | 3712 |
| 234 | Vieira do Minho | 3713 |
| 235 | Portimão | 3778 |
| 236 | Silves | 3796 |
| 237 | Lagos | 3808 |
| 238 | Budens | 3874 |
| 239 | Vila do Bispo | 3911 |
| 240 | Castro Marim | 3948 |
| 241 | Caminha | 3950 |
| 242 | Sagres | 4153 |
| 243 | Valença | 4190 |
| 244 | Melgaço | 4432 |
| 138 | Lisboa | 2875 |

Tabela 13 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Itinerários, 1800.

De acordo com a tabela 13 e a figura 37, o núcleo central do sistema de lugares, em termos de acessibilidade, constitui-se em dois pequenos *grupos*: um a Norte do Rio Tejo constituído por (Madalena, Asseiceira, Tomar, Abrantes, Ansião, Fátima, Alvaiázere, Entroncamento, Paço e Miranda do Corvo) e outro a Sul (Pavia, Arraiolos, Montemor-o-Novo, Évora, Ponte de Sôr, Santana do Mato, Alvito e Évora Monte), criando um eixo diagonal no centro do País, focadonas actuais NUTII: Lisboa e Vale do Tejo e Alentejo. Quanto aos lugares de menor acessibilidade topológica, uma consequência da externalidade geográfica (a Norte e a Sul), destacam-se os lugares: Melgaço, Valença, Caminha, Barcelos, Vieira do Minho, Cabeceiras de Basto e Vimioso a Norte; Sagres, Vila do Bispo, Pedralva, Budens, Espiche, Lagos, Silves, Alvor, Vila Real de Santo António, Castro Marim e Odeleite, sendo alguns deles lugares ‘porta’ (de entrada e saída) para o exterior, quer por mar, quer por continente (para a fronteira espanhola), conforme figura 36.

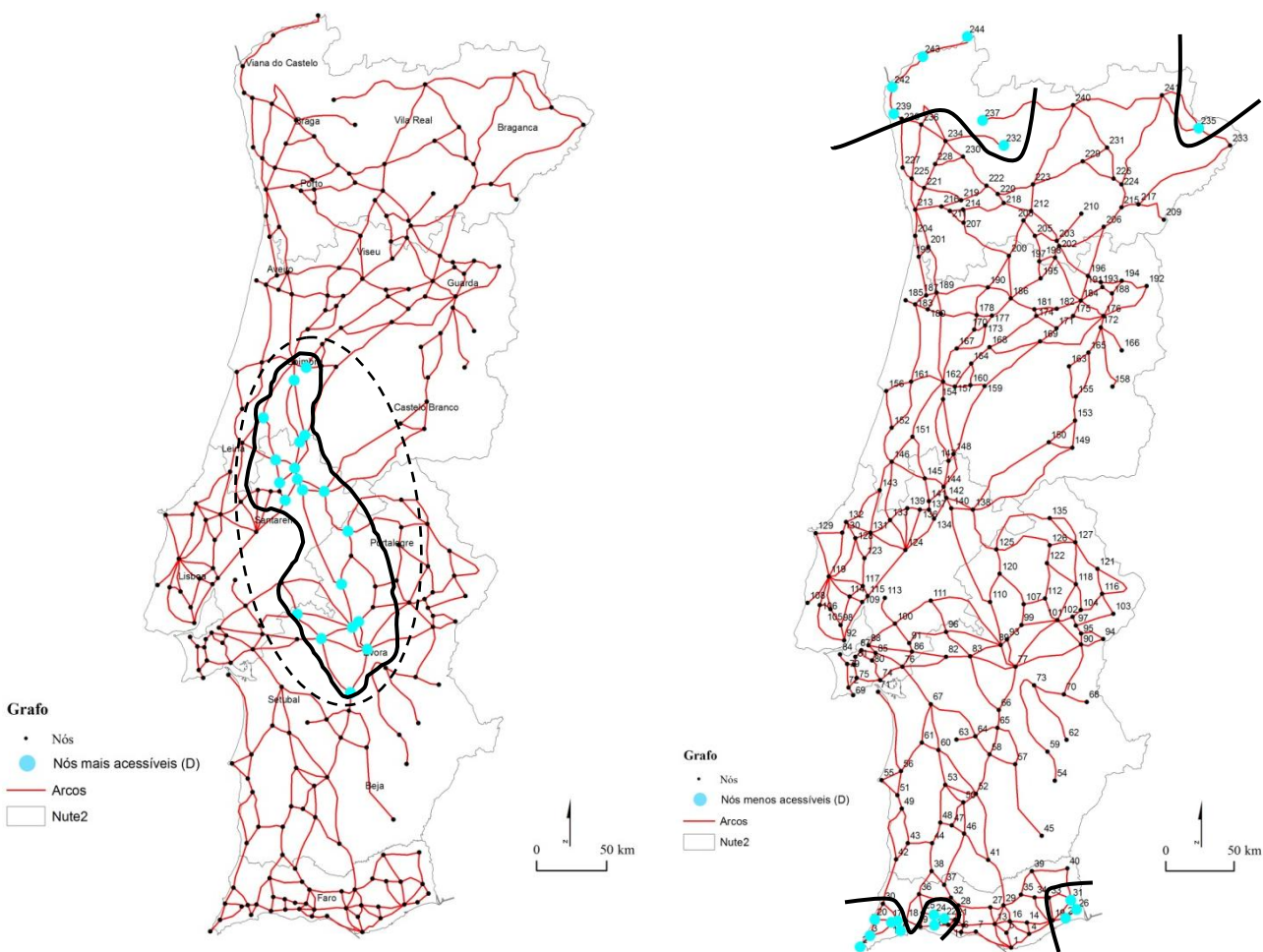


Fig. 37 - Grafo da Rede de Itinerários com identificação dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis calculados a partir da matriz D.

Numa análise comparativa com os mapas de acessibilidades (matriz D) da rede de Estradas Romanas (Figura 34), o facto mais relevante do ponto de vista da organização espacial, é o basculamento de aproximadamente 45° da elipse que resume a distribuição espacial do grupo dos nós mais acessíveis. De uma orientação horizontal Oeste – Este (Alenquer – Mérida), da rede de Estradas Romanas, para uma orientação diagonal NW – SE (Miranda do Corvo – Alvito), a partir da rede de Itinerários de 1800 (Figura 37).

Relativamente à hierarquia dos lugares, o que mais se destaca são os lugares menos acessíveis, ou melhor, a configuração das periferias, que se localizam, uma vez mais, num confronto Norte e Sul, com o Alto Minho e Trás-os-Montes e o Algarve, em que se situam os lugares que ficam topologicamente a uma maior distância de todos os outros.

Destaque ainda para a maior ‘centralidade’ que o centro do País assume, relativamente à rede de Estradas Romanas (cf. Figura 33). Tal facto deve-se à maior densidade e conectividade da rede, passou de uma estrutura em espinha ou árvore, para uma estrutura em malha, o que é também consequência do aumento de caminhos alternativos, ou seja, de maior número de circuitos entre os pares de nós.

Confrontando estes resultados das medidas topológicas, com os resultados das medidas de distribuição espacial, nomeadamente a medida central e a elipse de tendência, tanto para os nós da rede de estrada de 1800, como para o conjunto de pontos representativos das cidades existentes à data de 1800 (Figura 38).

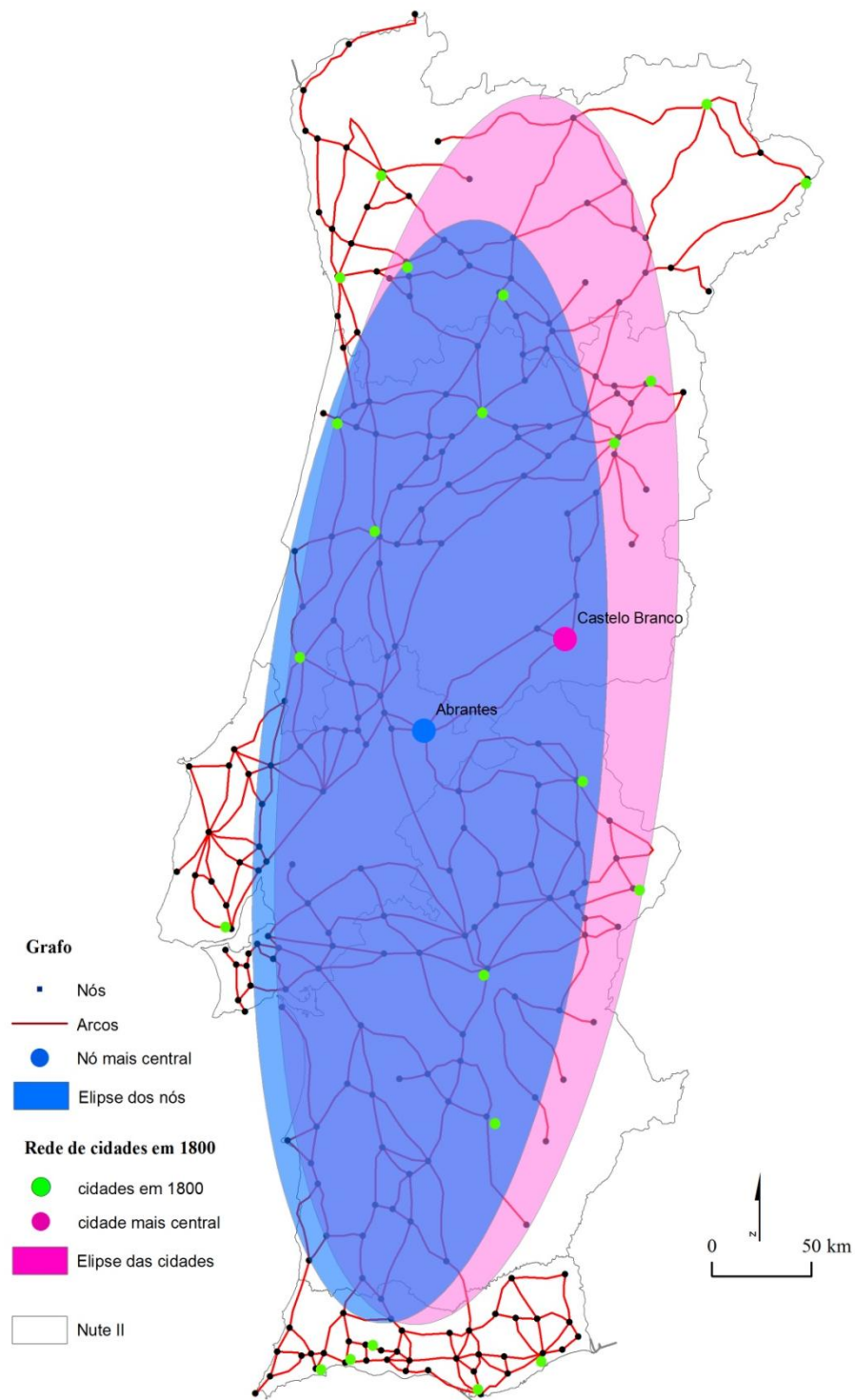


Fig. 38 - Grafo da rede de Itinerários de 1800, com o sistema de rede de cidades existentes em 1800, e as medidas de distribuição espacial

Conforme se pode verificar pela figura acima, entre a rede de lugares (nós) do grafo e a rede de cidades existentes em 1800, existe uma clara sobreposição espacial das elipses de

tendência, ou seja, a distribuição espacial dos nós de ambas as redes é em média bastante similar.

Contudo, há que destacar o facto de a rede de Itinerários de 1800 apresentar, uma maior concentração no Litoral, conforme se prova pela localização do centro em Abrantes e de uma elipse que se ‘encolhe’ a Norte (eixo do y) e ‘estreita’ (eixo do x) para junto do Litoral, face às medidas verificadas para a rede de cidades, em que o centro geométrico se muda para o Interior (Castelo Branco) e, conseqüentemente, faz aumentar, quer o eixo menor a Este, quer o eixo maior a Norte, até junto da fronteira.

Em termos comparativos, e numa análise espacio-temporal, a rede de estradas de 1800 mostra uma evidente alteração na organização espacial, reconfigurando as acessibilidades no território, sobretudo visível a Norte, com um basculamento do grupo dos lugares mais acessíveis, que a elipse de tendência das cidades em 1100 já dava indícios.

Segundo alguns analistas, esta organização espacial da rede de estradas é resultado de uma política apostada em suprir as necessidades de circulação existentes, “...não satisfeitas pela anterior rede de caminhos, o que leva a crer que a construção da nova rede de transportes terrestres teve mais a função de dar resposta a necessidades existentes do que de as desenvolver naquelas onde elas eram mais reduzidas” (Alegria, 1990:135).

Apesar da primeira metade do século XIX ter sido de maior fôlego político e financeiro, com repercussões no melhoramento da rede de infra-estruturas de transporte - graças a Costa Cabral primeiro e Fontes Pereira de Melo depois -, o século XIX termina com novas debilidades governativas e económicas que reconduzem Portugal a um atraso no processo de ajustamento das redes de transportes e comunicação às necessidades do País e, conseqüentemente, no percurso para o desenvolvimento (Abreu, 2005:237). Só quase meio século depois, na década de 30, com Duarte Pacheco a acumular os cargos de ministro das Obras Públicas e Presidente da Câmara Municipal de Lisboa, o País volta a sentir a existência de uma política de apoio ao desenvolvimento da rede de transportes. É também neste período, que surge o primeiro Plano Rodoviário, em 1945.

Rede de Estradas do Plano Rodoviário de 1945

Medidas Topológicas

A = 671

N = 390

G = 1

Índice gama (γ) = 0.58

Índice alfa (α) = 0.36

Índice de coesão (Cst) = 113.04

Índice do grau de desenv. (Gp) = 334.42

Índice dispersão = 2028876

Diâmetro da rede = 37

Índice acessibilidade (D)

422 (Castelo Branco)

901 (Caminha)

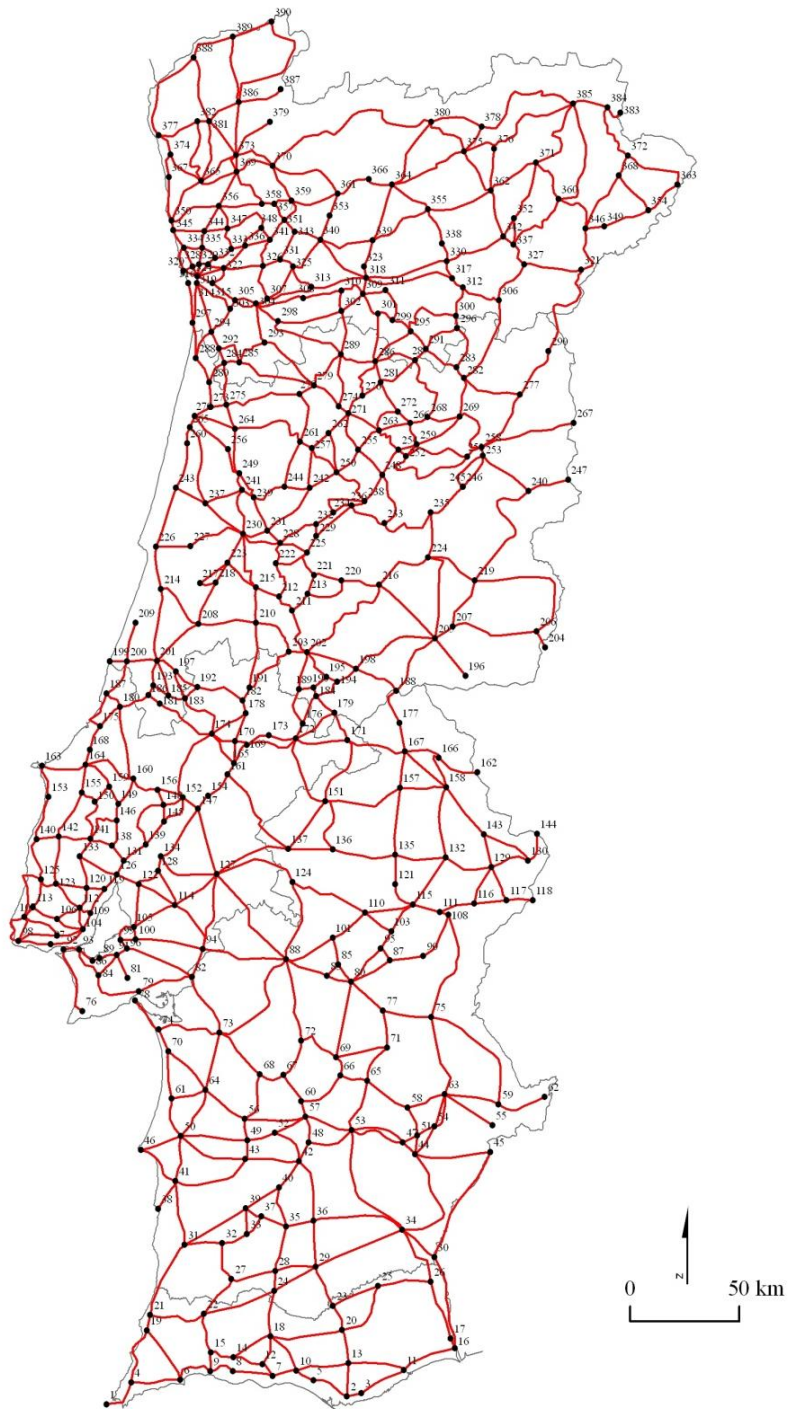


Fig. 39 – Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1945¹².

¹² Base cartográfica extraída do Decreto Lei 34593, de 11 de Maio de 1945.

Em que:

| | | |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 Sagres | 11 Tavira | 21 Aljezur |
| 2 Faro | 12 Tunes-Guia | 22 Monchique |
| 3 Olhão | 13 São Brás de Alportel | 23 Dogueno |
| 4 Vila do Bispo | 14 Silves | 24 S. Marcos da Serra |
| 5 Almansil | 15 Odelouca | 25 Giões |
| 6 Lagos | 16 Vila Real de Santo António | 26 Alcoutim |
| 7 Quarteira | 17 Castro Marim | 27 santa Clara-a-Velha |
| 8 Albufeira | 18 São Bartolomeu de | 28 Santana da Serra |
| 9 Portimão | 19 Messines | 29 Almodôvar |
| 10 Loulé | 20 Bordeira | 30 Pomarão-Santana de Cambas |
| 31 Odemira | 41 Cercal | 51 Brinches |
| 32 S. Martinho das | 42 Aljustrel | 52 Canhestros |
| 33 Amoreiras | 43 Alvalade | 53 Beja |
| 34 S. Martinho das | 44 Serpa | 54 Pias |
| 35 Amoreiras I | 45 Vila Verde de Ficalho | 55 Sobral da Adiça |
| 36 Mértola | 46 Sines | 56 Azinheira dos Barros |
| 37 Ourique | 47 Baleizão | 57 Ferreira do Alentejo |
| 38 Castro Verde | 48 Ervidel | 58 Pedrógão |
| 37 Garvão | 49 Ermidas do Sado | 59 Safara |
| 38 V Nova de Mil Fontes | 50 Santiago do Cacém | 60 Odivelas |
| 39 Colos | 71 Portel | 81 Palmela |
| 40 Messejana | 72 Alcáçovas | 82 Marateca |
| 61 Melides | 73 Alcácer do Sal | 83 Évora-São Matias |
| 62 Barrancos | 74 Comporta | 84 Amora |
| 63 Moura | 75 Reguengos de Monsaraz | 85 N. Sra. Graça do Divor |
| 64 Grândola | 76 Sesimbra | 86 Seixal |
| 65 Vidigueira | 77 São Manços | 87 S. Miguel de Machede |
| 66 Alvito | 78 Tróia | 88 Montemor-o-Novo |
| 67 Torrão | 79 Setúbal | 89 Arrentela |
| 68 Sta. Margarida da Serra | 80 Évora | 90 Redondo |
| 69 Viana do Alentejo | 101 Arraiolos | 111 Borba |
| 70 Pinheiro da Cruz | 102 Linda-a-Velha | 112 Odivelas |
| 91 Barreiro | 103 Évora Monte | 113 Montevar-Pêro Pinheiro |
| 92 Costa da Caparica | 104 Lisboa | 114 Santo Estevão |
| 93 Almada | 105 Alcochete | 115 Estremoz |
| 94 Vendas Novas | 106 Queluz | 116 Terrugem |
| 95 S. Bento do Mato | 107 Sintra | 117 Elvas |
| 96 Moita | 108 Vila Viçosa | 118 Caia-Badajoz |
| 97 Oeiras | 109 Sacavém | 119 Póvoa de Santa Iria |
| 98 Cascais | 110 Vimieiro | 120 Loures |
| 99 Montijo | 131 Carregado | 141 Carmões |
| 100 Atalaia | 132 Monforte | 142 Torres Vedras |
| 121 Sousel | 133 Sobral de Monte Agraço | 143 Arronches |
| 122 Benavente | | |
| 123 Malveira | | |

| | | | | | |
|-----|----------------------|-----|---------------------------|-----|--------------------|
| 124 | Mora | 134 | Salvaterra de Magos | 144 | Ouguela |
| 125 | Mafra | 135 | Fronteira | 145 | Cartaxo |
| 126 | Vila Franca de Xira | 136 | Maranhão | 146 | Alcoentre |
| 127 | Coruche | 137 | Montargil | 147 | Almeirim |
| 128 | Benavente-Salvaterra | 138 | Alenquer | 148 | Vale de Santarém |
| 129 | Santa Eulália | 139 | Azambuja | 149 | Cercal |
| 130 | Campo Maior | 140 | Silveira | 150 | Cadaval |
| 151 | Ponte de Sôr | 161 | Chamusca | 171 | Gavião |
| 152 | Santarém | 162 | Marvão | 172 | Abrantes |
| 153 | Lourinhã | 163 | Peniche | 173 | Constância |
| 154 | Alpiarça | 164 | Óbidos | 174 | Torres Novas |
| 155 | Bombarral | 165 | Golegã | 175 | Alfeizerão |
| 156 | São João da Ribeira | 166 | Castelo de Vide | 176 | Sardoal |
| 157 | Crato | 167 | Alpalhão | 177 | Nisa |
| 158 | Portalegre | 168 | Caldas da Rainha | 178 | Asseiceira |
| 159 | A-dos-Ruivos | 169 | Vila Nova da Barquinha | 179 | Mação |
| 160 | Rio Maior | 170 | Entroncamento | 180 | Alcobaça |
| 181 | Porto de Mós | 191 | Casais | 201 | Leiria |
| 182 | Tomar | 192 | Vila Nova de Ourém | 202 | Sertã |
| 183 | Fátima | 193 | Batalha | 203 | Castelo |
| 184 | Amêndoa | 194 | Cardigas | 204 | Segura |
| 185 | Batalha | 195 | São João do Peso-Cardigos | 205 | Castelo Branco |
| 186 | Calvaria de Cima | 196 | Malpica do Tejo | 206 | Zebreira |
| 187 | Nazaré | 197 | Arrabal | 207 | Escalos de Baixo |
| 188 | Vila Velha de Rodão | 198 | Proença-a-Nova | 208 | Pombal |
| 189 | Vila de Rei | 199 | Marinha Grande-S. Pedro | 209 | Carvide |
| 190 | Amêndoa | 200 | Muel | 210 | Ancião |
| 211 | Escalos do Meio | 200 | Marinha Grande | | |
| 212 | Castanheira de Pêra | 221 | Pessegueiro | 231 | Penacova |
| 213 | Portela do Fojo | 222 | Lousã | 232 | Carapinha |
| 214 | Marinha | 223 | Condeixa-a-Nova | 233 | Teixeira |
| 215 | Espinho-Penela | 224 | Fundão | 234 | Lourosa |
| 216 | Orvalho | 225 | Góis | 235 | Covilhã |
| 217 | Soure | 226 | Figueira da Foz | 236 | Nogueira de Cravo |
| 218 | Tapéus | 227 | Montemor-o-Velho | 237 | Cantanhede |
| 219 | São Miguel de Ancha | 228 | Poiares | 238 | Sandomil |
| 220 | Pampilhosa da Serra | 229 | Arganil | 239 | Pampilhosa |
| 241 | Mealhada | 230 | Coimbra | 240 | Sabugal |
| 242 | Santa Comba da Dão | 251 | Trinta | 261 | Besteiros |
| 243 | Mira | 252 | Gouveia | 262 | Sabugosa |
| 244 | Mortágua | 253 | Aldeia do Bispo | 263 | Mangualde |
| 245 | Belmonte | 254 | Vinho | 264 | Águeda |
| 246 | Belmonte | 255 | Nelas | 265 | Ílhavo |
| 247 | Aldeia da Ponte | 256 | Oliveira do Bairro | 266 | Tavares |
| 248 | Seia | 257 | Tondela | 267 | Vilar Formoso |
| 249 | Anadia | 258 | Guarda | 268 | Fornos de Algodres |
| 250 | Carregal do Sal | 259 | Vila Cortês da Serra | 269 | Celorico da Beira |
| | | 260 | Vagos | 270 | Aveiro |

| | | | | | |
|-----|----------------------|-----|-----------------------------|-----|--------------------------|
| 271 | Viseu | 281 | Sátão | 291 | Sequeiros-sernancelhe |
| 272 | Penalva do Castelo | 282 | Trancoso | 292 | S. João da Madeira |
| 273 | Angeja | 283 | Rio de Mel | 293 | Arouca |
| 274 | Bodiosa | 284 | Oliveira de Azeméis | 294 | Fiões |
| 275 | Albergaria-a-Velha | 285 | Vale de Cambra | 295 | Moimenta da Beira |
| 276 | Cavernões | 286 | Vila Nova de Paiva | 296 | Sarzedá |
| 277 | Pinhel | 287 | Aguiar da Beira | 297 | Espinho |
| 278 | Vouzela | 288 | Ovar | 298 | Espunça |
| 279 | S. Pedro do Sul | 289 | Castro Daire | 299 | Passo |
| 280 | Estarreja | 290 | Figueira de Castelo Rodrigo | 300 | Penedono |
| 301 | Gouveias | 311 | Armamar | 321 | Fornos |
| 302 | Várzea da Serra | 312 | Horta | 322 | Valongo |
| 303 | Raiva-canelas | 313 | Ancede | 323 | Santa Marta de Penaguião |
| 304 | Castelo de Paiva | 314 | Vila Nova de Gaia | 324 | S. Mamede de Infesta |
| 305 | Rio Mau-Lomba | 315 | Gondomar | 325 | Marco de Canavezes |
| 306 | Vila Nova de Foz Côa | 316 | Canidelo | 326 | Penafiel |
| 307 | Torrão | 317 | S. João da Pisqueira | 327 | Torre de Moncorvo |
| 308 | Cinfães | 318 | Peso da Régua | 328 | Leça do Bailio |
| 309 | Lamego | 319 | Porto | 329 | Rio Tinto |
| 310 | Resende | 320 | Matosinhos | 330 | Riba Longa |
| 331 | Meinedo | 341 | Lousada | 351 | Felgueiras |
| 332 | Ermesinde | 342 | Vila Flor | 352 | Trindade |
| 333 | Reguenga | 343 | Lixa | 353 | Celorico de Basto |
| 334 | Mindelo | 344 | Trofa-Bougado | 354 | Sendim |
| 335 | Alvarelhos | 345 | Vila do Conde | 355 | Murça |
| 336 | Paços de Ferreira | 346 | Mogadouro | 356 | Famalicão |
| 337 | Sampaio | 347 | Santo Tirso | 357 | Guimarães-Fafe |
| 338 | Alijó | 348 | Vizela | 358 | Guimarães |
| 339 | Vila Real | 349 | Mogadouro-Santiago | 359 | Fafe |
| 340 | Amarante | 350 | Póvoa de Varzim | 360 | Peredo |
| 361 | Cabeceiras de Basto | 371 | Macedo de Cavaleiros | 381 | Ponte de Lima |
| 362 | Mirandela | 372 | Vimioso | 382 | Seara |
| 363 | Miranda do Douro | 373 | Vila Verde | 383 | Petisqueira |
| 364 | Vila Pouca de Aguiar | 374 | Neiva | 384 | Quintanilha |
| 365 | Barcelos | 375 | Valpaços | 385 | Bragança |
| 366 | Ribeira de Pena | 376 | Vale de Gouvinhas | 386 | Ponte da Barca |
| 367 | Esposende | 377 | Viana do Castelo | 387 | Lindoso |
| 368 | Campo de Vímoras | 378 | Rebordelo-Sonim | 388 | Cerveira-Valença |
| 369 | Braga | 379 | Terras de Bouro | 389 | Monção |
| 370 | Póvoa do Lanhoso | 380 | Chaves | 390 | Melgaço |

Após a criação da Junta Autónoma de Estradas em 1927, por parte do Ministério das Obras Públicas, à altura sob a tutela do Eng^o Duarte Pacheco, as estradas passam a assumir papel mais relevante na organização do desenvolvimento económico do País e sucedem ao caminho-de-ferro (que tinha tido esse papel na segunda metade do século XIX), na expressão estruturante do ordenamento do território (Abreu, 2006; Santa-Rita, 2006).

Como testemunho dessa preocupação política, o Plano rodoviário de 1945 constituiu o reflexo legal da necessidade de se planear o transporte rodoviário com um certo sentido de equilíbrio territorial, embora sem ter por base qualquer tipo de modelo de ordenamento territorial (Abreu, 2006:347). Segundo Silveira, a preocupação política de então era sobretudo a de tentar garantir que a construção, reconstrução e melhoramento das estradas contribuíssem para combater o desemprego rural e desenvolver a economia, com prioritária incidência nas estradas do Litoral e a Sul do Tejo, por serem as que se encontravam mais debilitadas e ao mesmo as mais urgentes (Silveira, 1994:31).

Numa primeira apreciação, mesmo sem se recorrer a qualquer análise quantitativa, é notório o incremento da complexidade da rede de estradas que se verifica de uma forma generalizada por todo o País. E é precisamente nestas circunstâncias, quando a complexidade da rede é maior, que o uso das medidas topológicas e espaciais assumem uma acrescida importância, sendo mesmo indispensáveis para uma análise rigorosa das características da rede e da sua evolução sobre o território, quer para avaliar e identificar os lugares dominantes e mais competitivos, quer para apontar tendências evolutivas.

Os valores obtidos pelas medidas topológicas (Figura 39) mostram que a dimensão e a conectividade da rede sofreram um incremento face aos da rede de Itinerários de 1800, facto que decorre obviamente do aumento do número de nós, da maior densidade de arcos (com várias alternativas para ligarem os nós), mas também e sobretudo da estrutura da rede, ou seja da forma como os nós estão ligados e entre eles se relacionam, isto é, da organização espacial e da coesão e conectividade da rede.

Segundo o mais representativo indicador de conectividade (o índice gama (γ)), a rede de estradas do Plano rodoviário de 1945 é uma rede em malha, que passou de um índice de 53% para 58%, aproximando-se mais do valor de inflexão a partir do qual a rede assume uma

conectividade quase máxima ($\gamma = 66\%$), ou seja, uma rede coesa e num estado muito evoluído de maturação, com vários circuitos a assegurarem a comunicação entre os lugares.

Comparativamente às redes analisadas anteriormente (a rede de Estradas Romanas e a Rede de Itinerários do pré-fontismo de 1800), a rede de Estradas de 1945 apresenta um grau de conectividade da rede, que segundo o índice gama (γ) passa de 35%, da primeira para 53% em 1800 e 58% agora, face à conectividade máxima. Este aumento de conectividade é ainda reforçado pelo índice alfa (α), que mostra já uma relativa maturação da rede, como o valor obtido ($\alpha=0,36$), muito superior ao verificado para as outras redes, sugere.

Ainda relativamente às medidas topológicas é de destacar o valor resultante do índice de dispersão total da rede (Figura 39) muito acima dos verificados das redes anteriores, o que indica o maior desenvolvimento e complexidade da rede de Estradas de 1945.

Quanto à análise interna da rede, as medidas de acessibilidade e centralidade também mostram significativas transformações na organização territorial, com reflexo no que respeita aos lugares mais acessíveis e dos mais periféricos e menos acessíveis.

A leitura do grafo da rede do Plano rodoviário de 1945, de acordo com os resultados obtidos a partir da matriz D (Shimbel) (Tabela 14; Figura 40), mostra que os 20 lugares menos acessíveis identificados pela matriz C^1 (cf. Anexo) não se repetem agora no grupo dos 20 lugares menos acessíveis segundo a matriz D. Tal constatação verifica-se também com os aglomerados mais acessíveis (cf. Anexo), com Vila Verde e Porto a ocuparem agora o lugar 360 e 262 da ordenação da rede de lugares, respectivamente. Daqui se pode aferir, que à medida que a complexidade e o grau de conectividade e de coesão da rede aumenta, também a importância das ligações indirectas entre os nós é mais relevante para a determinação da ordem e organização espacial

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade D |
|---|---------------------|----------------------------|
| 1 | Sertã | 3787 |
| 2 | Orvalho | 3851 |
| 3 | Vila de Rei | 3863 |
| 4 | Sardoal | 3884 |
| 5 | Vila Velha de Ródão | 3887 |
| 6 | Ancião | 3888 |
| 7 | Castelo Branco | 3889 |
| 8 | Casais | 3891 |
| 9 | Abrantes | 3893 |
| 10 | Fundão | 3895 |
| 11 | Tomar | 3919 |
| 12 | Nisa | 3920 |
| 13 | Castelo | 3932 |
| 14 | Alpalhão | 3933 |
| 15 | Asseiceira | 3940 |
| 16 | Torres Novas | 3950 |
| 17 | Ponte de Sôr | 3958 |
| 18 | Proença-a-Nova | 3960 |
| 19 | Gavião | 3962 |
| 20 | Covilhã | 3971 |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> | | |
| 370 | Ponte de Lima | 6925 |
| 371 | Portimão | 6962 |
| 372 | Ponte da Barca | 7030 |
| 373 | Terras de Bouro | 7040 |
| 374 | Sagres | 7083 |
| 375 | Esposende | 7099 |
| 376 | Seara | 7186 |
| 377 | Neiva | 7188 |
| 378 | Loulé | 7200 |
| 379 | Tunes-Guia | 7213 |
| 380 | S. Brás de Alportel | 7216 |
| 381 | Olhão | 7277 |
| 382 | Cerveira-Valença | 7306 |
| 383 | Albufeira | 7323 |
| 384 | Monção | 7411 |
| 385 | Melgaço | 7415 |
| 386 | Lindoso | 7418 |
| 387 | Viana do Castelo | 7565 |
| 388 | Quarteira | 7572 |
| 389 | Almansil | 7584 |
| 390 | Faro | 7600 |
| 289 | Lisboa | 5873 |

Tabela 14 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Estradas do Plano rodoviário de 1945

Graças à capacidade de visualização e manuseamento de informação geográfica facultada pelos SIG, é fácil identificar e localizar quais os lugares menos acessíveis (e consequentemente, mais periféricos) que, segundo a matriz D, são os lugares localizados geometricamente no centro do território, formando um grupo mais ou menos elipsoidal no Interior do país, o que se deve à existência de uma maior densidade de cobertura¹³ da rede de estradas (leia-se itinerários) no território.

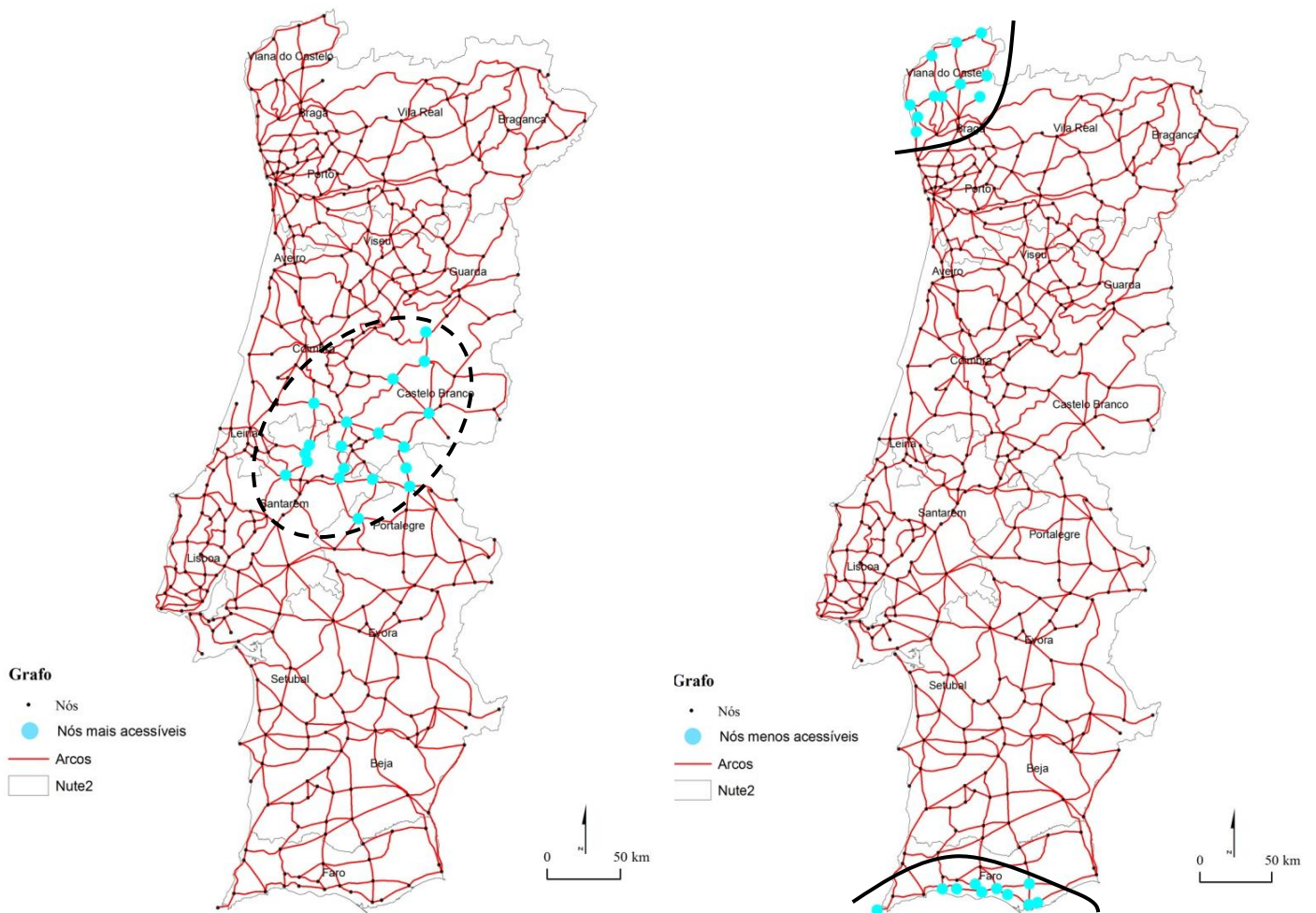


Fig. 40 – Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1945 com identificação do grupo dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis, calculados a partir da matriz D

Relativamente ao grupo dos lugares menos acessíveis e que compõem a periferia da rede, segundo a matriz D, existe claramente uma dualidade Norte – Sul, tal como se tinha observado para o sistema de lugares analisado numa matriz relativa à Rede de Itinerários de

¹³ É o quociente entre o somatório de todos os arcos (L^j) e a área total (A) do País.

1800. O Norte volta a ser território do grupo do Alto Minho (Monção, Melgaço, Ponte de Lima, Ponte da Barca, Viana do Castelo, Terras de Bouro e Esposende); e o Sul, apesar de nem todos os lugares permanecerem, é também novamente território para o grupo de alguns lugares menos acessíveis (e.g. Portimão, Sagres, Faro) a que, agora em 1945, se juntam também Loulé, Quarteira, Albufeira, S. Brás de Alportel, Olhão e Tunes.

Prosseguindo na mesma linha metodológica já apresentada, inicia-se agora a análise das características da rede, evidenciado pelos valores das medidas de distribuição espacial.

O lugar mais central desta rede, determinado a partir do grafo é agora, Vila de Rei¹⁴, o que significa um deslocamento ligeiro, para o interior (Figura 41). Pelo contrário, e também no que concerne a transformação espacial ocorrida, destaque-se a deslocação para norte e para o litoral do nó mais central do sistema de cidades para Coimbra, a substituir Castelo Branco.

¹⁴ Em 1800 era Abrantes, o lugar mais acessível, segundo o grafo da rede de Itinerários.

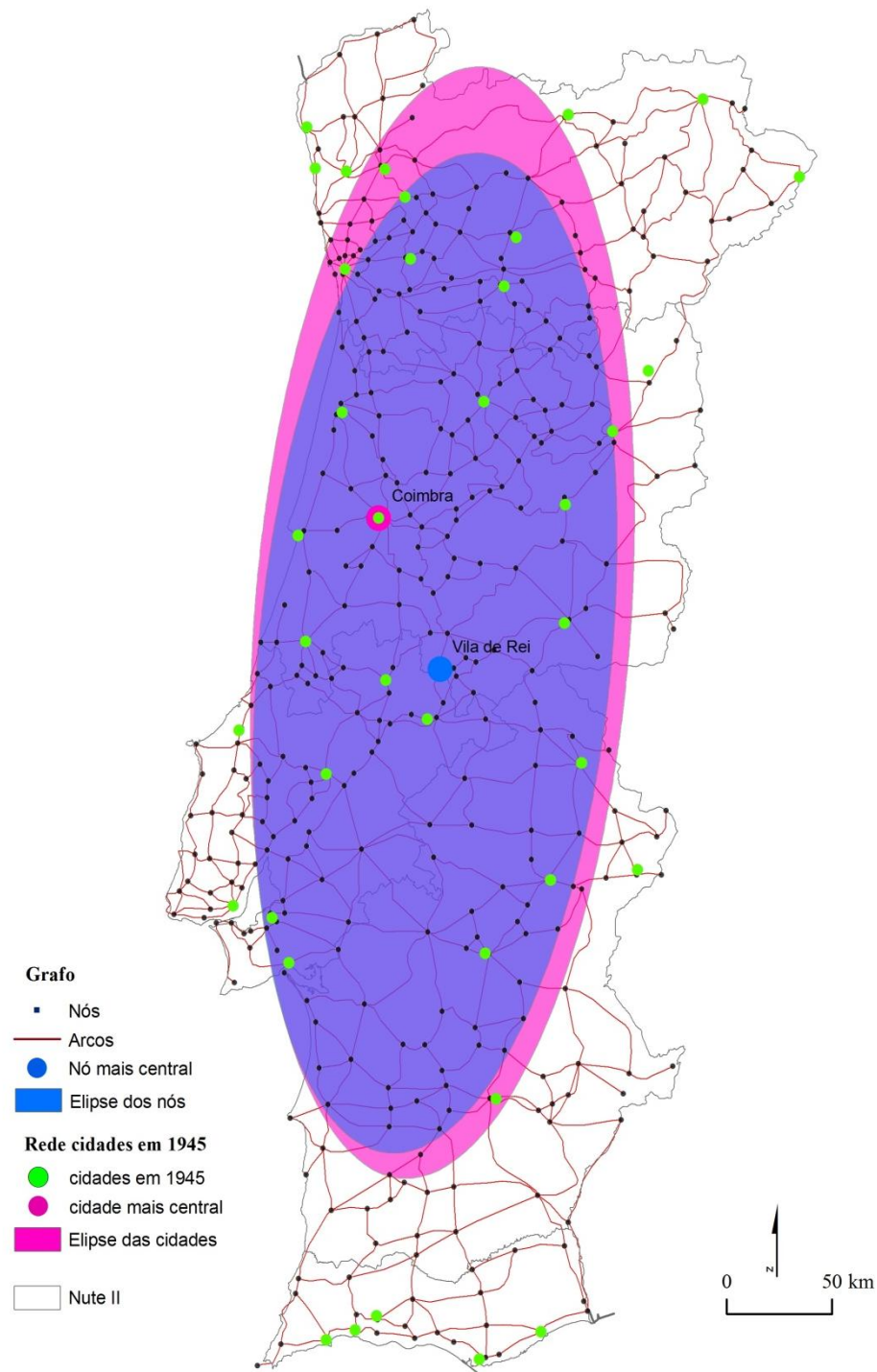


Fig. 41- Grafo com o sistema de rede de cidades existente em 1945, e as medidas de distribuição espacial.

Na realidade, se o centro muda bastante (quase 80 km), as elipses são quase coincidentes. A Norte, a elipse de distribuição espacial das cidades estende-se até à fronteira, atravessando o Gerês (Lindoso e as terras baixas do Rio Cavado), enquanto a elipse dos nós do grafo se fica por Terras de Basto e menos expandida a Sul. No eixo menor, no sentido litoral e interior, as elipses evidenciam uma quase sobreposição, ainda que face ao verificado para a rede de 1800, se observe agora uma maior cobertura do litoral.

Em síntese, o que as medidas topológicas e as métricas territoriais revelam é um País com uma rede de estradas coesa e com um forte grau de conectividade, o que denota uma hierarquia da rede de lugares bastante equilibrada no geral. Tais resultados, vêm sublinhar a afirmação que de Abreu faz acerca da importância desta rede rodoviária de 1945: “Neste período são as estradas (...) que organizam o desenvolvimento económico e que constituem a expressão estruturante do ordenamento do território nacional.” (Abreu, 2005:347).

A partir da segunda metade do século XX, a motorização confirma um crescimento incessante, originando uma população cada vez mais móvel, na consequência de um forte aumento do parque automóvel¹⁵. Estes acontecimentos são mais vinculados a partir da década de 1970, por altura em que um outro acontecimento marcante para o desenvolvimento das infra-estruturas rodoviárias de transporte se inicia: a influência da política de transporte europeia. Com efeito, em 1969, já com um mercado europeu reconhecível, a política comunitária de transportes começa a assumir maior protagonismo a nível de uma política económica (Silveira, 1994:35).

O pedido de adesão, que em 1985 Portugal apresenta à C.E.E. (Comunidade Económica Europeia e actual União Europeia) teve como consequências a melhoria das acessibilidades internas e externas. Foi neste contexto, que em 1978 se iniciaram os processos de revisão do Plano Rodoviário de 1945, que por sua vez se concluíram com a aprovação do Decreto-lei nº380/85 que consagra o segundo Plano Rodoviário Nacional (PRN), e que constitui o próximo objecto de análise deste trabalho. Assim sendo, a estrutura da rede de estradas do PRN85 considerada pode visualizar-se a partir da figura do grafo seguinte:

¹⁵ “Nos trinta anos que medeiam entre 1970 e 2000 verificou-se um fortíssimo aumento do parque automóvel em Portugal, que, crescendo a uma taxa anual média próxima de 7,8%, viu duplicar o seu número a cada nove anos” (Abreu, 2005:351). Note-se que acerca destes valores, o autor faz menção de alertar para o facto de ter de haver algum cuidado na sua avaliação, já que “alguns veículos matriculados já não existem, pois as viaturas deixaram de circular ou foram destruídas, sem que os proprietários tenham efectuado o respectivo abate, devido à falta de obrigatoriedade em o fazer e à inexistência de incentivos para tal” (Abreu, 2005:351).

A Rede de Estradas do Plano Rodoviário de 1985

Medidas Topológicas

Arcos = 220

Nós = 181

SubGrafo = 1

Índice gama (γ) = 0.41

Índice alfa (α) = 0.11

Índice de coesão (Cst) = 73.22

Índice do grau de desenv. (Gp) = 108.68

Índice dispersão = 272136

Diâmetro da rede = 35

Índice acessibilidade (D)

D_{\max} = 1460 (Leiria)

D_{\min} = 3478 (Castro Marim)

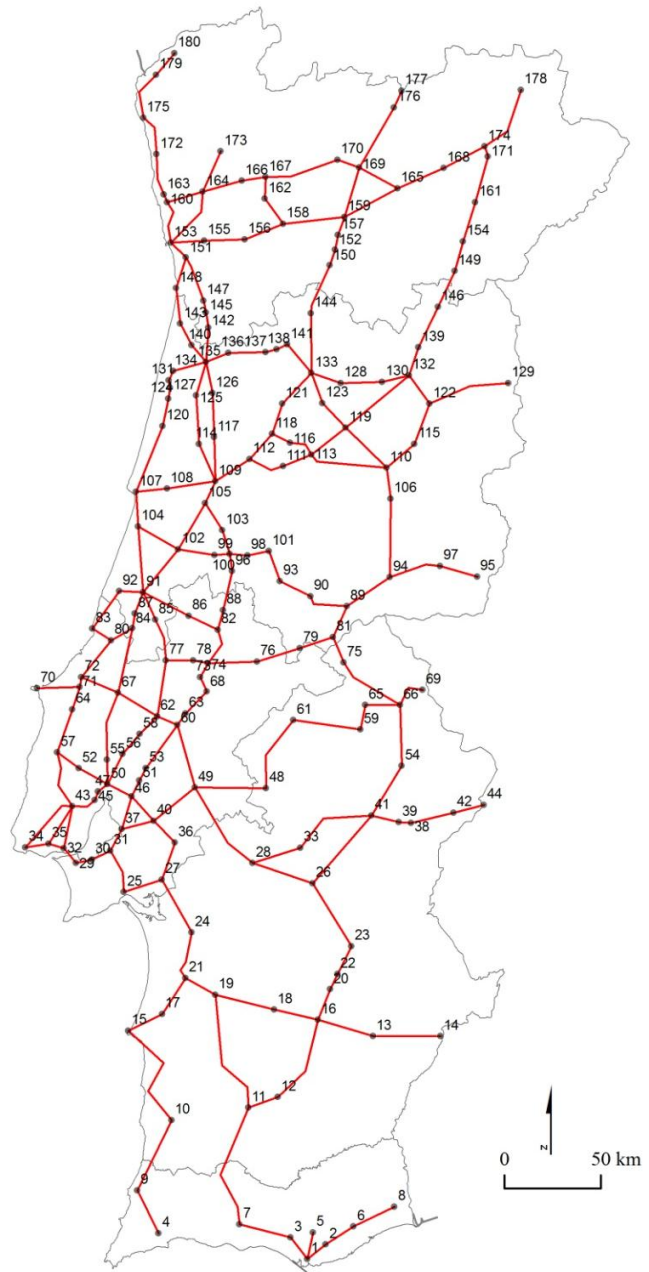


Fig. 42 – Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1985¹⁶.

¹⁶ Base cartográfica extraída do Decreto-Lei 380/85, de 26 de Setembro de 1985.

Em que:

| | | | | | |
|-----|----------------------|-----|-----------------------|-----|------------------------|
| 1 | Faro | 11 | Ourique | 21 | Grândola |
| 2 | Olhão | 12 | Castro Verde | 22 | Vidigueira |
| 3 | Loulé | 13 | Serpa | 23 | Portel |
| 4 | Lagos | 14 | Vila Verde de Ficalho | 24 | Alcácer do Sal |
| 5 | São Brás de Alportel | 15 | Sines | 25 | Setúbal |
| 6 | Tavira | 16 | Beja | 26 | Évora |
| 7 | Albufeira | 17 | Santiago do Cacém | 27 | Landeira-Marateca |
| 8 | Castro Marim | 18 | Ferreira do Alentejo | 28 | Montemor-o-Novo |
| 9 | Aljezur | 19 | Canal Caveira | 29 | Almada |
| 10 | Odemira | 20 | Cuba | 30 | Barreiro |
| 31 | Montijo | 41 | Estremoz | 51 | Benavente |
| 32 | Lisboa | 42 | Elvas | 52 | Sobral de Monte Agraço |
| 33 | Arraiolos | 43 | Loures | 53 | Salvaterra de Magos |
| 34 | Cascais | 44 | Caia | 54 | Monforte |
| 35 | Oeiras | 45 | Alverca | 55 | Alenquer |
| 36 | Canha | 46 | Samora Correia | 56 | Azambuja |
| 37 | Alcochete | 47 | Alhandra | 57 | Torres Vedras |
| 38 | Vila Viçosa | 48 | Mora | 58 | Cartaxo |
| 39 | Borba | 49 | Coruche | 59 | Alter do Chão |
| 40 | Santo Estevão | 50 | Vila Franca de Xira | 60 | Almeirim |
| 61 | Ponte de Sôr | 71 | Óbidos | 81 | Vila Flor |
| 62 | Santarém | 72 | Caldas da Rainha | 82 | Tomar |
| 63 | Alpiarça | 73 | Golegã | 83 | Nazaré |
| 64 | Bombarral | 74 | Entroncamento | 84 | Porto de Mós |
| 65 | Crato | 75 | Nisa | 85 | Fátima |
| 66 | Portalegre | 76 | Abrantes | 86 | Vila Nova de Ourém |
| 67 | Rio Maior | 77 | Alcanena | 87 | Batalha |
| 68 | Chamusca | 78 | Torres Novas | 88 | Ferreira do Zêzere |
| 69 | Marvão | 79 | Mação | 89 | Vila Velha de Rodão |
| 70 | Peniche | 80 | Alcobaça | 90 | Proença-a-Nova |
| 91 | Leiria | 101 | Pedrógrão Grande | 111 | Arganil |
| 92 | Marinha Grande | 102 | Pombal | 112 | Penacova |
| 93 | Sertã | 103 | Penela | 113 | Oliveira do Hospital |
| 94 | Castelo Branco | 104 | Carriço | 114 | Cantanhede |
| 95 | Segura | 105 | Condeixa | 115 | Belmonte |
| 96 | Alvaiázere | 106 | Fundão | 116 | Tábua |
| 97 | Idanha-a-Nova | 107 | Figueira da Foz | 117 | Mealhada |
| 98 | Figueiró dos Vinhos | 108 | Montemor-o-Velho | 118 | Santa Comba Dão |
| 99 | Ansião | 109 | Coimbra | 119 | Seia |
| 100 | Avelar | 110 | Covilhã | 120 | Mira |
| 121 | Tondela | 131 | Gafanha da Nazaré | 141 | São Pedro do Sul |

| | | | | | |
|-----|-------------------------|-----|----------------------|-----|-----------------------|
| 122 | Guarda | 132 | Celorico da Beira | 142 | Vale de Cambra |
| 123 | Nelas | 133 | Viseu | 143 | Ovar |
| 124 | Vagos | 134 | Aveiro | 144 | Castro Daire |
| 125 | Oliveira do Bairro | 135 | Albergaria-a-Velha | 145 | São João da Madeira |
| 126 | Águeda | 136 | Sever do Vouga | 146 | Sernancelhe |
| 127 | Ílhavo | 137 | Oliveira de Frades | 147 | Santa Maria da Feira |
| 128 | Mangualde | 138 | Gouveia | 148 | Espinho |
| 129 | Vilar Formoso | 139 | Trancoso | 149 | Vila Nova de Foz Côa |
| 130 | Fornos de Algodres | 140 | Estarreja | 150 | Lamego |
| 151 | Gaia | 161 | Alfândega da Fé | 171 | Macedo de Cavaleiros |
| 152 | Peso da Régua | 162 | Felgueiras | 172 | Esposende |
| 153 | Matosinhos-Porto | 163 | Póvoa de Varzim | 173 | Braga |
| 154 | Torre de Moncorvo | 164 | Famalicão | 174 | Macedo de Cavaleiros |
| 155 | Valongo | 165 | Murça | 175 | Viana do Castelo |
| 156 | Penafiel | 166 | Guimarães | 176 | Chaves |
| 157 | Sta. Marta de Penaguião | 167 | Fafe | 177 | Vila Verde da Raia |
| 158 | Amarante | 168 | Mirandela | 178 | Bragança |
| 159 | Vila Real | 169 | Vila Pouca de Aguiar | 179 | Caminha |
| 160 | Vila do Conde | 170 | Ribeira de Pena | 180 | Vila Nova de Cerveira |

Numa primeira e imediata impressão feita ao grafo da Rede de Estradas do Plano Rodoviário Nacional de 1985 (PRN85), o que se verifica é uma alteração na estrutura da rede, revelada pelas densidades e.g. densidade de arcos (D_L), densidade de nós (D_N) e densidade da rede (D_R). Formalmente:

$$D_L = \frac{L}{A}, \quad D_N = \frac{N}{A}, \quad D_R = \frac{L}{N}$$

Em que L respeita ao número de arcos; A respeita à Área (km²) em estudo e R , respeita à rede (grafo).

Com efeito, no caso das densidades de arcos e de nós, constata-se uma diminuição de valores: D_L passa de 0,0076, em 1945 para 0,0025 em 1985 e D_N passa de 0,0044 em 1945, para 0,0020 em 1985. Esta diminuição das densidades é uma consequência directa da diminuição do número de arcos e do número de nós. Contudo, ao olhar-se para os valores da densidade da rede D_R , em que a relação entre o número de arcos e o número de nós é o mais importante, e a dimensão da área é desprezível, verifica-se uma ligeira diminuição: D_R passa de 1,7, em 1945 para 1,2 em 1985. Isto significa que, apesar da diminuição acentuada do

número de nós e do número de arcos entre as datas em análise, e uma ligeira diminuição da densidade da rede, a rede mantém uma elevada conectividade. Em suma, a rede melhora, mesmo quando a estrutura base de nós diminui bastante. Tal facto é consequência directa de uma nova orientação política, que se materializa na desafecção de algumas vias, do poder Central para o Local. Apontado como um dos motivos à revisão do PR45, a gestão centralizada de tamanha densidade de estradas deixou de fazer sentido num País que passa a adoptar uma “...política de regionalização, que confere às autarquias um cada vez maior grau de autonomia” (Decreto-Lei nº380/85 de 26 de Setembro).

Assim, em consonância com o critério original assumido para a selecção e aquisição de informação rodoviária, permaneceu a escolha pelos itinerários principais, que a classificação das vias, definida pelos decretos-lei que consagravam juridicamente as comunicações rodoviárias nacionais, determinou as estradas que integram o modelo de criado.

Para o PRN85, as estradas classificadas como Rede Fundamental (constituída pelos Itinerários Principais) e também a Rede complementar¹⁷ (Itinerários Complementares) foram as seleccionadas. Esta decisão, apesar de não tirar rigor ao estudo, vai influir nos resultados e consequentemente, na análise comparativa -, quer para as medidas topológicas, quer para as medidas de distribuição espacial, uma vez que afecta o número de arcos e nós.

Com efeito, é na consequência da política de desafecção de estradas, que o número de arcos e de nós diminuiu significativamente face ao PR45 (passou de 671 arcos e 390 nós, para 220 arcos e 180 nós). Não obstante, a estrutura da rede não sofreu significativas alterações, como é indicado pelas medidas topológicas de conectividade e de ligação (Figura 42).

Se é verdade que o índice gama (γ) teve um decréscimo de 17%, ao passar dos 58% para 41% face à conectividade máxima, o que dá conta de uma perda de coesão da rede, quando analisado conjuntamente com o diâmetro da rede (37 para PR45 e 35 para PRN85) e os índices de coesão ($Cst = 113.04$, para PR45 e $Cst = 73.22$, para PRN85) e do grau de desenvolvimento ($Gp = 334.42$, para PR45 $Gp = 108.68$, para PRN85), os resultados

¹⁷ As estradas classificadas como “Outras estradas”, no Decreto Lei nº380/85 de 26 de Setembro, não foram consideradas, por coerência de critérios com as outras redes em análise.

reflectem o contrário (cf. Cap. 2.3.1), i.e. um ganho de coesão (ainda que ligeira), apesar da diminuição da densidade da rede.

Em suma, tem-se uma rede com uma estrutura coesa, de que se adivinha (e só se pode confirmar pela análise individual obtida a partir do cálculo de matrizes) a existência de algum desequilíbrio espacial e topológico, quanto à conectividade e acessibilidade dos nós, e um país com uma política rodoviária orientada para “...o desenvolvimento de potencialidades regionais...” (Decreto Lei 380/85 de 26 de Setembro).

Todavia, para se averiguar esta transformação de índole política sofrida pela rede rodoviária e qual o seu impacto na organização territorial, é preciso completar a análise recorrendo aos resultados das medidas topológicas de acessibilidade e centralidade, as quais concedem uma leitura interna e individualizada da rede.

Apesar das transformações da rede ditada por uma política de desenvolvimento apoiada no sistema rodoviário como alavanca, no que respeita à organização espacial do sistema de lugares, as evoluções ocorridas, vistas pelo prisma da matriz de ligações directas C^1 , não sofrem praticamente nenhuma alteração de estrutura topológica (cf. Anexo). Todavia, conforme atrás referido (cap. 2), é a matriz D que melhor permite aferir acerca da acessibilidade dos nós que compõem a rede, bem como a que maior rigor empresta à análise comparativa das redes.

Assim, da análise aos resultados obtidos a partir da matriz D, capaz de incorporar as ligações indirectas e, simultaneamente, eliminar as redundâncias, o que se verifica não é a continuidade que a análise da matriz C^1 sugeria. Pelo contrário, e conforme se pode observar a partir da tabela 15, dos 20 mais acessíveis lugares segundo a matriz C^1 , apenas 5 se repetem entre os 20 mais acessíveis de acordo com a matriz D (que são Leiria, Pombal, Coimbra, Santarém e Rio Maior), e mesmos estes com posições diferentes na hierarquia da rede. Destas mudanças topológicas decorrem também alterações nos padrões espaciais, com diferentes organizações a desenharem-se no território, conforme se pode verificar pelos grafos das figuras 43, derivadas do cálculo da matriz D.

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade D |
|------------|-----------------------|----------------------------|
| 1 | Leiria | 1460 |
| 2 | Pombal | 1471 |
| 3 | Condeixa | 1492 |
| 4 | Fátima | 1499 |
| 5 | Alcanena | 1502 |
| 6 | Coimbra | 1509 |
| 7 | Santarém | 1534 |
| 8 | Batalha | 1544 |
| 9 | Carriço | 1546 |
| 10 | Figueira da Foz | 1570 |
| 11 | Porto de Mós | 1574 |
| 12 | Penacova | 1579 |
| 13 | Rio Maior | 1583 |
| 14 | Montemor-o-Velho | 1593 |
| 15 | Vila Nova de Ourém | 1598 |
| 16 | Almeirim | 1602 |
| 17 | Marinha Grande | 1614 |
| 18 | Torres Novas | 1616 |
| 19 | Ansião | 1620 |
| 20 | Cantanhede | 1629 |
| ----- | | |
| 160 | Mirandela | 2638 |
| 161 | Fafe | 2646 |
| 162 | Chaves | 2655 |
| 163 | Macedo de Cavaleiros | 2687 |
| 164 | Braga | 2696 |
| 165 | Póvoa de Varzim | 2701 |
| 166 | Loulé | 2780 |
| 167 | Odemira | 2789 |
| 168 | Vila Verde da Raia | 2833 |
| 169 | Bragança | 2865 |
| 170 | Esposende | 2873 |
| 171 | Faro | 2950 |
| 172 | Aljezur | 2965 |
| 173 | Viana do Castelo | 3047 |
| 174 | Olhão | 3124 |
| 175 | São Brás de Alportel | 3128 |
| 176 | Lagos | 3143 |
| 177 | Caminha | 3223 |
| 178 | Tavira | 3300 |
| 179 | Vila Nova de Cerveira | 3401 |
| 180 | Castro Marim | 3478 |
| 130 | Lisboa | 2284 |

Tabela 15 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Estradas do Plano rodoviário nacional de 1985



Fig. 43 – Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1985, com identificação do grupo dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis, calculados a partir da matriz D

Efectivamente, enquanto os resultados da matriz C^1 reflectiam uma dispersão dos nós mais acessíveis pelo território (cf. Anexo), os resultados da matriz D revelam uma situação em que se verifica uma concentração espacial do grupo dos nós mais acessíveis (Figura 43). De igual modo, confrontando-se os mapas do PRN85 (Figura 43) com os do PR45 (Figura 40), verifica-se um deslocamento espacial do grupo dos nós mais acessíveis para o litoral, que se traduz pela maior acessibilidade que agora têm os lugares de Leiria, Fátima, Alcanena, Batalha, Pombal e Rio Maior.

Situação idêntica passa-se com os nós menos acessíveis. Face aos resultados da matriz C^1 , não só a topologia difere, como também o padrão espacial se altera, passando-se do

padrão ‘dispersão’ de nós pelo território, para uma maior concentração dos lugares periféricos, acentuando a diferenciação espacial.

Quanto à análise comparativa com os resultados obtidos pela matriz D, do PR45, as semelhanças espaciais sobrelevam às diferenças pontuais, com a substituição de uns nós por outros, na hierarquia da rede de lugares. Os grupos do Alto Minho e do Algarve continuam, ainda que com ligeiras alterações, quer na hierarquia dos lugares, quer na distribuição espacial. A norte, o grupo dos lugares menos acessíveis para o PRN85 sofre uma deslocação para este, ao englobar também lugares dos Distritos de Vila Real e de Bragança. A sul, as mudanças espaciais são insignificantes, permanecendo no grupo dos menos acessíveis um conjunto de lugares, que vai do Barlavento ao Sotavento Algarvio.

O modelo territorial que a rede evidencia, reproduz, como seria natural, o modelo territorial existente. Não obstante o significativo decréscimo do número de nós e de arcos do grafo do PRN85 face ao grafo do PR45, ou seja, independentemente de a topologia variar, sobretudo no que respeita à sua estrutura, as relações espaciais entre os lugares e as estradas permanece praticamente inalterável, conforme testemunham a quase sobreposição das elipses de tendência, para ambos os períodos analisados (cf. Figuras 41 e 44).

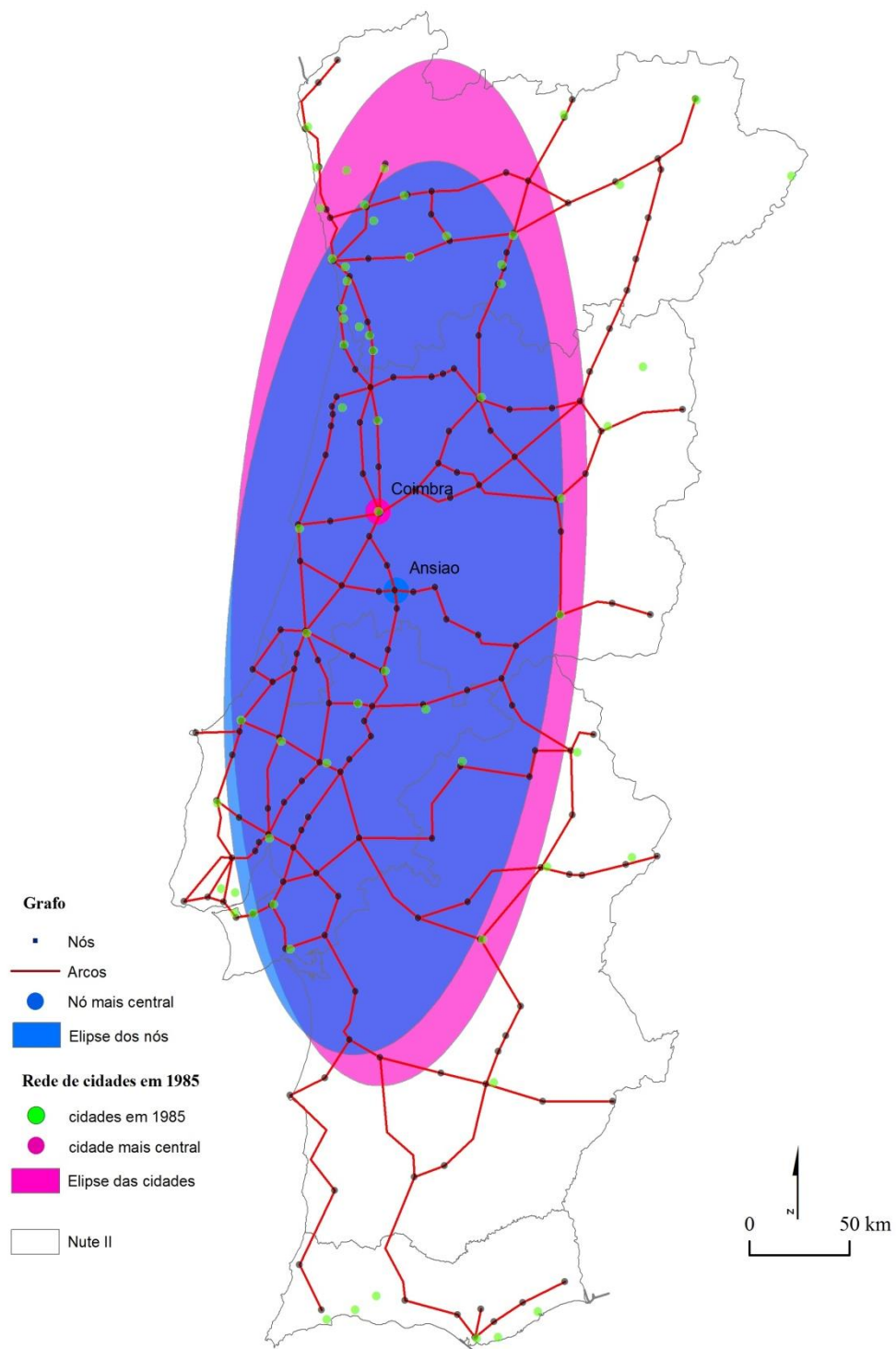


Fig. 44 - Grafo com o sistema de rede de cidades existente em 1985, e as medidas de distribuição espacial

Todavia, algumas transformações, ocorreram nos 40 anos entre os Planos, a saber:

- A mudança do nó mais central, pelo cálculo das medidas de distribuição espacial, de Vila de Rei em 1945, para Ansião em 1985, facto que traduz uma tendência de aproximação da rede de estradas à rede de cidades, ao aproximar-se de Coimbra, que permanece como a cidade mais central, do conjunto de cidades existentes à data. O que traduz uma diminuição da distância entre nós centrais da rede de estradas e da rede de cidades entre 1945 e 1985. Mais precisamente uma diminuição de cerca de 36km, face aos 75km que distam Vila de Rei de Coimbra, em 1945 e os 39km calculados para Ansião e Coimbra, em 1985.
- Um movimento de aproximação dos nós da rede de estradas para junto do litoral, resultado da política de planeamento do PRN85.
- Menos evidente, no processo de transformações ocorridas, é o ligeiro deslocamento das elipses para norte. A deslocação mais evidente na elipse das cidades existentes à data é contudo muito pouco sentida na elipse do grafo.
- Verifica-se ainda, e mais uma vez com destaque para a elipse das cidades, uma deslocação para o litoral.

No cômputo geral, o que se constata é a constância do padrão organizativo da geografia da rede, que tem como reflexo directo a manutenção de uma certa ordem espacial, com os nós da rede a sofrerem apenas ligeiras mudanças, enquanto a rede de cidades existentes evidencia uma “...permanência histórico-geográfica...” (Gaspar e Rodriguez, 2006:64), conforme testemunha o resultado obtido pela medida de centralidade para os vários períodos em análise, com Coimbra a permanecer como o lugar central da rede de cidades.

Apenas 10 anos após a instituição do PRN85, o governo considerou necessário proceder à sua revisão, tendo em consideração os desenvolvimentos socioeconómicos decorrentes da adesão de Portugal à União Europeia (Decreto-Lei nº 222/98:3444). Sobre este assunto, Diogo de Abreu escreve: “O PRN de 2000 tomou em conta que as melhorias na rede (...) e as novas procuras de transporte de pessoas e mercadorias induzidas pelo desenvolvimento do país, que tinham como consequência a duplicação de tráfego entre 1985 e

1995, evidenciavam estrangulamentos e deficiências que importava agora melhorar”. (Abreu:2005:348).

Neste enquadramento político e técnico, o governo justificou a revisão do PRN85, apontando objectivos que se podem considerar nos seguintes tópicos:

- Territoriais (uma melhor cobertura rodoviária do País, quer a nível nacional, quer a nível regional);
- Económicos (desenvolvimento das potencialidades regionais e redução do custo global dos transportes);
- Sociais (aumento da segurança rodoviária);
- Socioeconómicos (correção das assimetrias no desenvolvimento socioeconómico do País) e ambientais (imposição da realização de estudos de impacto ambiental aquando do projecto para construção de novas estradas), com vista a minorar as consequências negativas destas infra-estruturas

É na sequência das revisões propostas que foi instituído o PRN2000, com base no Decreto-lei nº 222/98 de 17 de Julho. Que é também a versão que se considerou para análise.

Segundo o PRN2000, a rede rodoviária nacional é agora constituída pela rede nacional fundamental e pela nacional complementar. Sendo que a rede nacional fundamental contempla os itinerários principais (IP)¹⁸ e a rede complementar integra os itinerários complementares (IC)¹⁹ e as estradas nacionais (EN). Para o trabalho, e de acordo com os critérios assumidos, apenas se considerou os itinerários principais e os itinerários complementares.

¹⁸ “Os itinerários principais são as vias de comunicação de maior interesse nacional, servem de base de apoio a toda a rede rodoviária nacional e asseguram a ligação entre os centros urbanos com influência supradistrital e destes com os principais portos, aeroportos e fronteiras.” (Decreto-Lei nº 222/98:3445).

¹⁹ “Os itinerários complementares são as vias que, no contexto do plano rodoviário nacional, estabelecem as ligações de maior interesse regional, bem como as principais vias envolventes e de acesso nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto.” (Decreto-Lei nº 222/98:3445).

Rede de Estradas do Plano Rodoviário Nacional 2000

Medidas Topológicas

$A = 263$

$N = 175$

$G = 1$

Índice gama (γ) = 0.51

Índice alfa (α) = 0.26

Índice de coesão (Cst) = 57.89

Índice do grau desenv. (Gp) = 130.33

Índice dispersão = 308592

Diâmetro da rede = 26

Índice acessibilidade (D)

$D_{\max} = 1238$ (Coimbra)

$D_{\min} = 2603$ (Valença)



Fig. 45 – Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 2000²⁰.

²⁰ Base cartográfica extraída do Decreto Lei 222/98, de 17 de Julho.

Em que:

| | | |
|---|------------------------------------|--------------------------------|
| 1 Faro | 11 Serpa | 21 Qta. do Anjo |
| 2 Loulé | 12 Sines | 22 Évora |
| 3 Albufeira | 13 Vila Verde Ficalho | 23 Qta. do Conde |
| 4 Vila do Bispo | 14 Santiago de Cacém | 24 Marateca |
| 5 Tavira | 15 Beja | 25 Coima |
| 6 Lagoa - Silves | 16 Grândola - Ferreira do Alentejo | 26 Seixal |
| 7 Portimão | 17 Grândola | 27 Vendas Novas |
| 8 Vila Real Sto António - Castro Marim | 18 Alcácer do Sal | 28 Palhais |
| 9 Ourique | 19 Setúbal | 29 Costa da Caparica |
| 10 Castro Verde - Beja | 20 Palmela | 30 Montemor-o-Novo |
| 31 Almada | 41 Sacavém | 51 Coruche |
| 32 Barreiro | 42 Odivelas | 52 Alhandra |
| 33 Oeiras | 43 Estremoz | 53 Vila Franca Xira |
| 34 Montijo | 44 Ramada | 54 Torres Vedras |
| 35 Linda-a-Velha - Algés | 45 Póvoa-Sta. Iria | 55 Almeirim |
| 36 Lisboa | 46 Sto. Estevão | 56 Cartaxo |
| 37 Amadora | 47 Loures | 57 Ponte de Sôr |
| 38 Queluz | 48 Caia | 58 Santarém |
| 39 Agualva - Cacém | 49 Elvas | 59 Portalegre |
| 40 Sintra | 50 Alverca | 60 Rio Maior |
| 61 Peniche | 71 Tomar | 81 Pombal |
| 62 Óbidos | 72 Vila Nova de Ourém | 82 Monfortinho |
| 63 Torres Novas | 73 Fátima | 83 Carriço |
| 64 Entroncamento | 74 Batalha | 84 Fundão |
| 65 Barquinha | 75 Vila Velha de Rodão | 85 Condeixa |
| 66 Abrantes | 76 Marinha Grande | 86 Figueira da Foz |
| 67 Alcobaça | 77 Leiria | 87 Coimbra |
| 68 Barragem do Fratel | 78 Castelo Branco | 88 Covilhã |
| 69 Alcobaça - Nazaré | 79 Ansião | 89 Coimbra - Mealhada |
| 70 Nazaré | 80 Idanha-a-Nova | 90 Oliveira do Hospital |
| 91 Penacova | 101 Águeda | 111 Albergaria-a-Velha |
| 92 Sta. Comba Dão | 102 Guarda | 112 Trancoso |
| 93 Mealhada | 103 Vagos - Ílhavo | 113 Estarreja |
| 94 Mira | 104 Vilar Formoso | 114 Oliveira de Azeméis |
| 95 Seia | 105 Mangualde | 115 Vale de Cambra |
| 96 Anadia | 106 Gafanha da Nazaré | 116 Ovar |
| 97 Gouveia | 107 Viseu | 117 S. João da Madeira |
| 98 Tondela | 108 Celorico da Beira | 118 Feira |
| 99 Oliveira do Bairro | 109 Aveiro | 119 Esmoriz |
| 100 Nelas | 110 Sever do Vouga | 120 Espinho |
| 121 Moimenta Beira - Tarouca | 131 Peso da Régua | 141 Matosinhos - Vila do Conde |

| | | |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 122 Lourosa - Faiões | 132 Porto | 142 Maia |
| 123 Barca de Alva | 133 Infesta - Porto | 143 Amarante |
| 124 V. Nova de Foz Côa | 134 Valongo | 144 Paços Ferreira |
| 125 Avintes - Gaia | 135 Matosinhos | 145 Vila Flor |
| 126 Lamego | 136 Rio Tinto | 146 Freamunde |
| 127 Canidelo - Gaia | 137 Leça do Balio | 147 Lousada |
| 128 Gondomar | 138 Parede | 148 Vila Real |
| 129 Gaia | 139 Penafiel | 149 Sto Tirso |
| 130 Valbom | 140 Ermesinde | 150 Lousada - Vizela |
| 151 Vila do Conde | 161 Miranda do Douro | 171 Bragança |
| 152 Famalicão | 162 Barcelos | 172 Ponte da Barca - Lindoso |
| 153 Vizela | 163 Braga | 173 Bragança - Portelo |
| 154 Murça | 164 Esposende | 174 nó Valença |
| 155 Póvoa de Varzim | 165 Macedo Cavaleiros | 175 Valença |
| 156 Guimarães | 166 Viana do Castelo | |
| 157 Fafe | 167 Bragança - Rio Frio | |
| 158 Póvoa de Varzim - Esposende | 168 Chaves | |
| 159 Vila Pouca de Aguiar | 169 Ponte de Lima | |
| 160 Mirandela | 170 Vila Verde da Raia | |

Com uma política de desenvolvimento e crescimento económico do País assente na construção de estradas e auto-estradas, o que já acontecia com o PRN85, o PRN2000 assumiu-se como um instrumento estratégico de ordenamento do território. Desta aposta decorreram transformações da rede como medidas de ajustamento às necessidades da actual conjuntura económica, social e ambiental na tentativa de corrigir erros (assimetrias regionais nas acessibilidades e na mobilidade) e potenciar o desenvolvimento regional.

Neste quadro de opções o PRN2000, consegue apresentar um aumento da conectividade, conforme atestam os índices de conectividade e de coesão do grafo acima indicados, com destaque para o índice gama ($\gamma = 51\%$) da conectividade máxima, o índice alfa ($\alpha = 26\%$), ainda que denote valor baixo, é significativamente superior ao verificado para o PRN85 (19%), e o índice do grau de desenvolvimento de Zagozdzon (G_p), que a sofrer uma diminuição relativamente ao resultado obtido para o PRN85, evidencia o aumento de coesão da rede (faltam menos componentes à rede para atingir uma conectividade máxima) e, consequentemente, um maior grau de desenvolvimento, que de resto é comprovado por pela diminuição do diâmetro da rede (26).

A este aumento de conectividade da rede está directamente relacionado o aumento do número de arcos (aumenta o número de circuitos) e uma diminuição (ainda que muito diminuta) do número de nós, o que significa, que existem mais caminhos alternativos para se aceder aos mesmos lugares.

Em suma, numa análise da estrutura da rede pode afirmar-se a partir dos resultados aqui obtidos, que nem sempre um maior número de arcos e nós na rede (sobretudo a partir de uma certa complexidade, conforme verificado entre a rede de 1945 e 1985), se traduz em maior conectividade e coesão. É a forma como se estabelecem as ligações, que vão influenciar esses índices. Não obstante, para atestar esta apreciação mais geral, é fundamental o exercício de escala, isto é, fazer a análise nó a nó.

Para cumprir com este propósito é imperioso o cálculo de matrizes e a análise das distâncias mais curtas entre os nós. Assim, e no seguimento metodológico até aqui adoptado determinou-se a hierarquia dos nós do grafo a partir da matriz de acessibilidade de Shimbel (cf. Tabela 16) e comparou-se as transformações espaciais ocorridas, entre as suas congéneres para os períodos antecedentes analisados.

| <i>Ordenação</i> | <i>Lugar</i> | <i>Índice de acessibilidade D</i> |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Coimbra - Mealhada | 1238 |
| 2 | Anadia | 1252 |
| 3 | Condeixa | 1275 |
| 4 | Ansião | 1282 |
| 5 | Penacova | 1301 |
| 6 | Sta Comba Dão | 1315 |
| 7 | Oliveira do Bairro | 1325 |
| 8 | Águeda | 1325 |
| 9 | Mealhada | 1332 |
| 10 | Tomar | 1342 |
| 11 | Figueira da Foz | 1342 |
| 12 | Albergaria-a-Velha | 1346 |
| 13 | Nelas | 1350 |
| 14 | Carriço | 1351 |
| 15 | Mira | 1356 |
| 16 | Vila Velha de Rodão | 1364 |
| 17 | Tondela | 1373 |
| 18 | Barquinha | 1380 |
| 19 | Viseu | 1387 |
| 20 | Oliveira do Hospital | 1392 |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> | | |
| 156 | Seixal | 2213 |
| 157 | Costa da Caparica | 2213 |
| 158 | Loulé | 2249 |
| 159 | Lagoa - Silves | 2250 |
| 160 | Tavira | 2258 |
| 161 | Bragança - Rio Frio | 2259 |
| 162 | Bragança - Portelo | 2259 |
| 163 | Vila do Bispo | 2263 |
| 164 | Ponte de Lima | 2263 |
| 165 | Barcelos | 2267 |
| 166 | Póvoa de Varzim | 2274 |
| 167 | Barreiro | 2301 |
| 168 | Póvoa de Varzim - Esposende | 2389 |
| 169 | Portimão | 2416 |
| 170 | Faro | 2422 |
| 171 | Viana do Castelo | 2428 |
| 172 | Nó Valença | 2430 |
| 173 | Ponte da Barca - Lindoso | 2436 |
| 174 | Esposende | 2552 |
| 175 | Valença | 2603 |
| 118 | Lisboa | 1923 |

Tabela 16²¹ – Hierarquia da rede urbana, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Estradas do Plano rodoviário nacional de 2000.

²¹ Apenas se faz referência aos 20 mais e menos acessíveis lugares.

Fazendo uma análise comparativa dos vinte lugares mais acessíveis determinados pela matriz C^1 (cf. Anexo), das redes de estradas dos vários períodos temporais, apenas 5 lugares (Coimbra-Mealhada, Anadia, Condeixa, Albergaria-a-Velha e Viseu) continuam a pertencer ao conjunto dos lugares mais acessíveis determinados pela matriz D. Contudo, verificam-se mudanças na ordem hierárquica dos lugares, nomeadamente Albergaria-a-Velha, que na matriz C^1 aparece como o lugar mais acessível e na matriz D passa a ocupar a 12ª posição. Menos acentuada no entanto, são as mudanças de ordem do nó Coimbra-Mealhada, do 2º para passar ocupar o 1º lugar e Anadia de 4º para 2º lugar na hierarquia de acessibilidades

Tal como verificado para o PRN85, de um padrão espacial de dispersão dos lugares pelo território, passa-se para um padrão de concentração, conforme se pode ver pelas figuras 50 (nós mais acessíveis e menos acessíveis, pela matriz D).

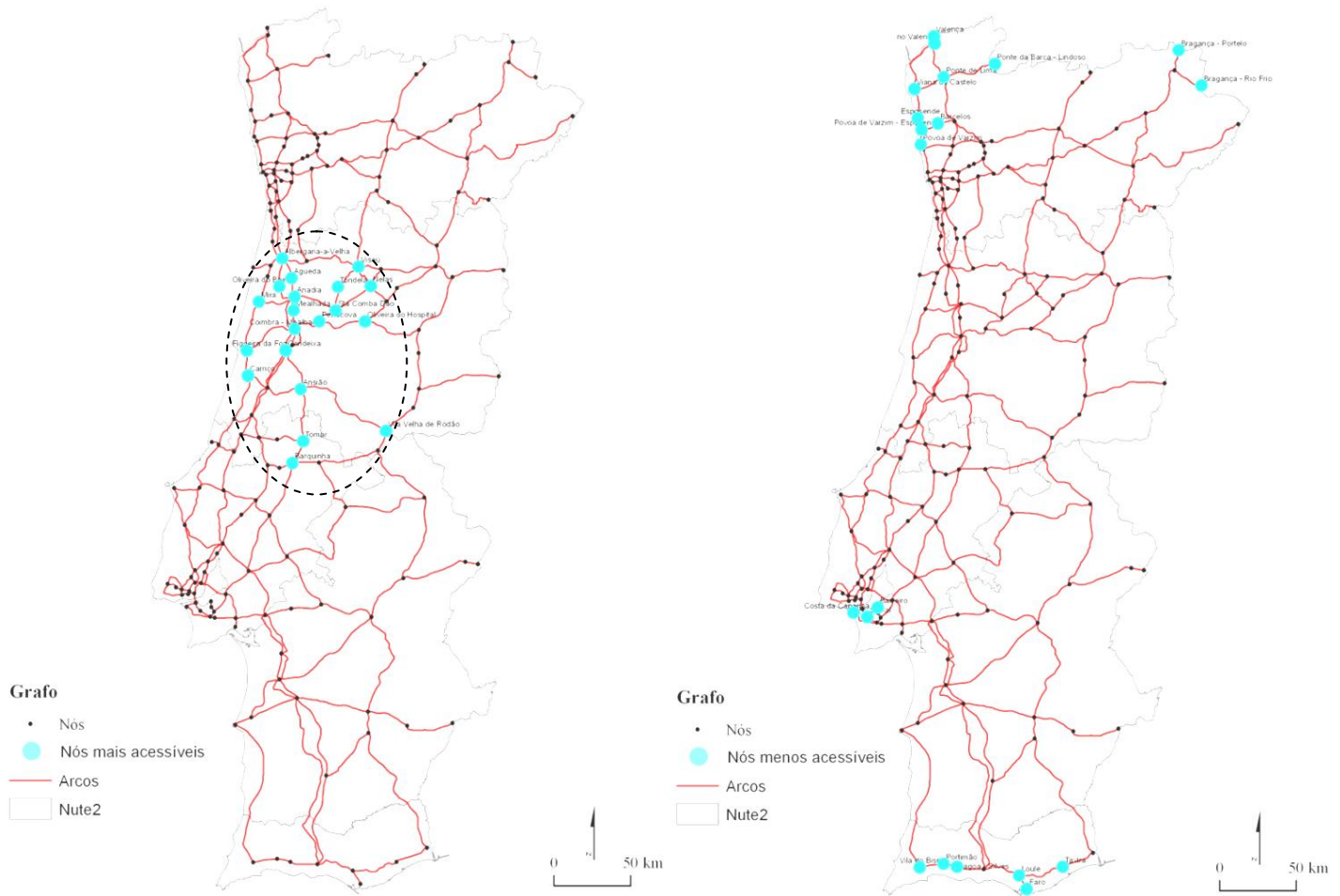


Fig. 50 – Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental 2000 com identificação do grupo dos lugares mais e menos acessíveis calculados a partir da matriz D.

Da análise ao mapa da figura 50, com a representação dos lugares mais acessíveis, o que ressalva é a progressiva aproximação do grupo dos lugares mais acessíveis para junto do litoral, relativamente aos mapas análogos das redes do PR45 (Figura 40) e PRN85 (Figura 43)

Quanto à distribuição espacial dos lugares menos acessíveis existem semelhanças e diferenças, face ao verificado para os períodos antecedentes. Das semelhanças, o destaque vai para o padrão concentração, em detrimento do padrão dispersão, assim como a manutenção dos grupos de lugares do Alto Minho (reforçado no litoral para sul, com a inclusão de Esposende e Póvoa de Varzim) e Algarve (permanece o mesmo eixo do litoral). No que se refere a diferenças, a nota de destaque vai para o surgimento de mais dois grupos de lugares (ainda que compostos por um diminuto número de nós):

- O *grupo* de Bragança, com Portelo e Rio Frio, cuja inclusão entre os lugares menos acessíveis se deve à exclusão (por desclassificação) do arco representativo da estrada nº 103, do mapa do grafo do PRN85, que ligava Vila Verde da Raia a Vinhais e a Bragança; e
- O *grupo* da Península de Setúbal, composto pelos lugares Costa de Caparica, Seixal e Barreiro e cuja razão para integrarem no PRN2000 a lista dos lugares menos acessíveis, se deve à não inclusão no grafo das estradas nºs 4, 5, 10, 378 e 379, que asseguram a ligação entre eles e para fora da Península de Setúbal.

Recorde-se no entanto, que a não inclusão destas estradas no grafo do PRN2000 se deveu à desclassificação da rede levada a cabo pelo decreto-lei 222/98 de 17 de Julho, e ao facto de se querer manter a coerência da linha metodológica adoptada e dos critérios que a sustentam.

Quanto às medidas de análise de distribuição espacial, os resultados obtidos vêm reforçar o quadro organizacional determinado, quer pelas medidas topológicas, quer pelas medidas de distribuição espacial do PRN85.

Com efeito, e conforme se pode observar pela figura 51 abaixo, o lugar mais central dos nós da rede de estradas coincide com o lugar mais acessível da matriz D: nó Coimbra-Mealhada, o que indica uma sobreposição da topologia com a geografia, ou seja, dos resultados das medidas topológicas com os resultados das medidas de distribuição espacial. Esta interpretação ganha ainda mais consistência quando comparadas as elipses de tendência calculadas, quer para os nós da rede de estradas, quer para as cidades existentes.

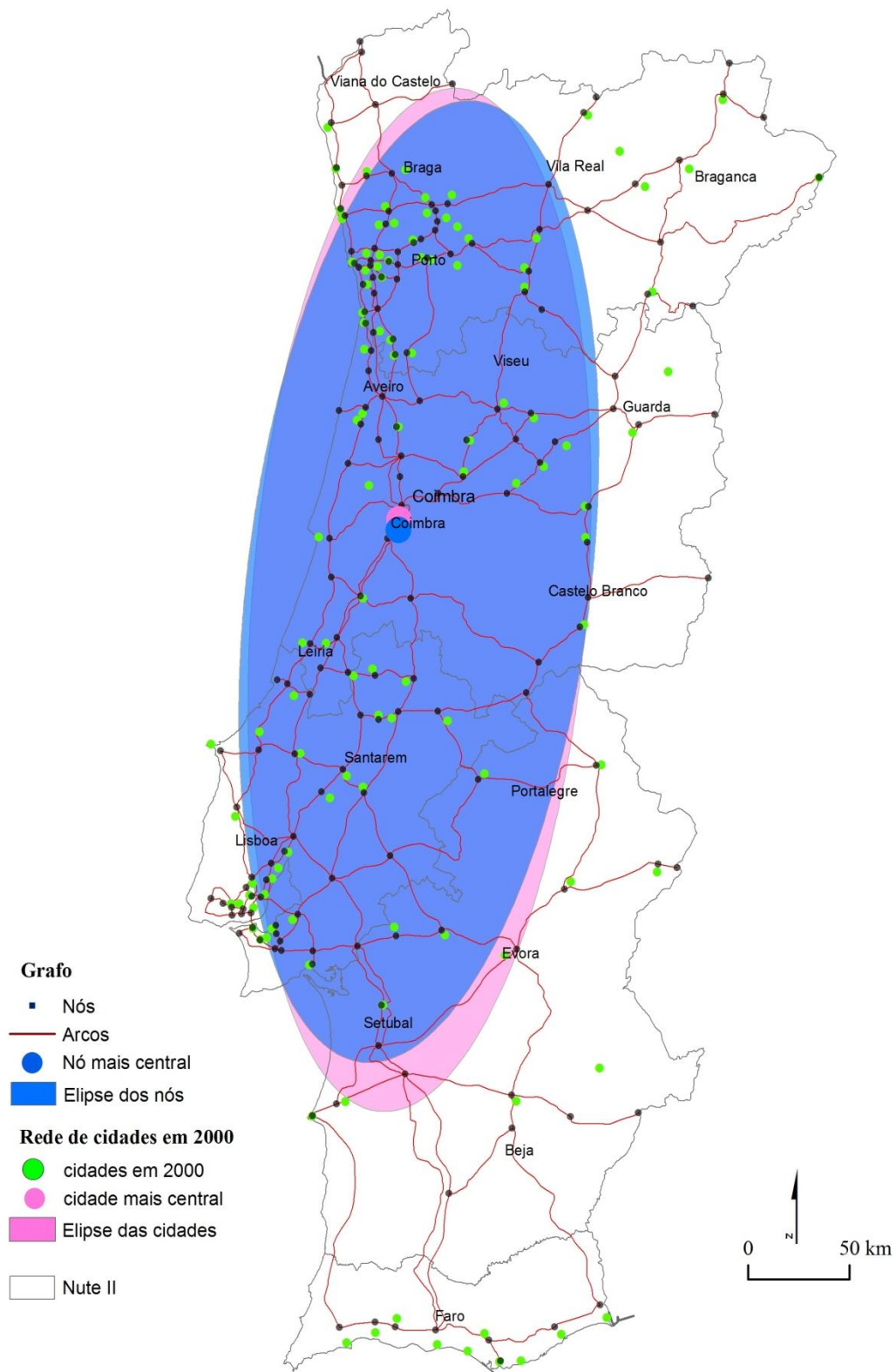


Fig. 51 - Grafo com o sistema de cidades existentes em 2000, e as medidas de distribuição espacial

Ao observar-se a figura acima, verifica-se a existência de uma coincidência espacial do mais central da rede de estradas com a cidade mais central da rede de cidades existentes em 2000. E ao confrontarem-se os resultados obtidos pelas mesmas medidas para os períodos antecedentes, verifica-se que ocorreu ao longo destes anos um aproximar da estrutura topológica da rede de estradas à localização física dos elementos, ou seja, as relações topológicas coincidem, na determinação do lugar mais acessível, com o resultado obtido pelas medidas de distribuição espacial.

Numa leitura mais circunscrita à rede em análise, constata-se que existe uma sobreposição dos lugares centrais, em que Coimbra a assume-se como a cidade que materializa centralidade.

Todavia, numa análise comparativa mais estendida no tempo, o que se verifica é uma aproximação da estrutura topológica da rede de estradas com a estrutura de localização física da rede de cidades. Observando-se a tabela 17 abaixo verifica-se que é Coimbra que surge quase sempre como a cidade mais central das redes de cidades ao longo destes 2000 mil anos, e a tendência de aproximação do lugar mais central da rede de estradas que se foram estruturando no território até à sua sobreposição com o PRN2000. Igualmente, de acordo com as medidas topológicas da Teoria dos Grafos para análise da acessibilidade da rede estradas, o que se constata é também um aproximar no sentido interior – litoral, que as elipses de tendência deixam perceber.

| | <i>MEDIDAS DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL</i> | | <i>MEDIDA TOPOÓGICA</i> |
|----------------|--------------------------------------|------------------------|---|
| | Cidade mais central | Nó mais central | (Matriz D) Nó mais acessível |
| Romanos | Coimbra | Ponte de Sôr | Ad Septem Aras (Campo Maior) |
| 1800 | Castelo Branco | Abrantes | Madalena |
| 1945 | Coimbra | Vila de Rei | Sertã |
| 1985 | Coimbra | Ansião | Leiria |
| 2000 | Coimbra | Coimbra | Coimbra-Mealhada |

Tabela 17 – Leitura comparativa dos lugares de maior acessibilidade pelas medidas distribuição espacial e topológicas, desde os Romanos até ao PRN2000

Contudo, apesar do modelo empírico proporcionado pelo *geo_grafo*, que vem provar a existência e o grau de influência da rede de transportes rodoviários na estruturação do território, mais precisamente na localização e na relação entre os lugares, a verdade é que se pode fazer uma crítica fácil ao modelo, o que de resto foi a crítica clássica a muitos dos modelos microeconómicos de análise espacial das décadas de 1930 e de 1940 (cf. Tabela 1): trata-se de um modelo isotrópico, que não considera o espaço enquanto uma variável mutável, de acordo com as diferentes direcções, isto é, o espaço mantém as mesmas características independentemente de quaisquer outros factores, e.g. população, distância física, etc. Para dar uma resposta à crítica, tentou integrar-se no *geo_grafo* uma algoritmia que pudesse dar forma empírica a um espaço anisotrópico, e assim confrontar uma vez mais a topologia e o território, para medir a influência que as rodovias exercem sobre a ordem espacial.

6.2. O Modelo anisotrópico para análise do efeito da rede de transportes rodoviários na organização espacial

Ao contrário dos modelos isotrópicos, nos modelos anisotrópicos adoptam-se métodos de análise de interacção espacial, em que o espaço assume diferentes propriedades com a mudança de direcção. Para o efeito adoptaram-se dois métodos: um decorrente da Teoria dos Grafos e baseado no cálculo de matrizes ponderadas (cf. Cap. 2), de distâncias físicas (matriz L) ou reais, que se confrontarão com os resultados apurados pelas distâncias topológicas (matriz D); e outro decorrente da teoria de gravidade de Isaac Newton (1687), a partir de modelos gravíticos, para avaliar e mediar a capacidade de interacção entre os lugares da rede e os padrões espaciais que estruturam.

6.2.1. Matriz Ponderada L (distância física)

Apesar de já se ter dissertado sobre a matriz L no capítulo 2 importa agora dizer da importância que esta matriz desempenha para a análise do efeito das redes de transporte sobre a hierarquização dos lugares e o seu posicionamento relacional. Claro que as matrizes anteriores já ajudavam a perceber esse efeito e o seu grau de impacte, mas então tratava-se de uma análise baseada num modelo isotrópico, ou seja em que o espaço era considerado como isotrópico, em que todas as ligações (arcos) eram tidas como de igual importância (peso) na

determinação do grau de acessibilidade dos lugares. Com a matriz ponderada L , de distâncias físicas, o espaço passa a ser considerado como anisotrópico e passa-se a definir a hierarquia de acessibilidades dos lugares não somente em função das ligações que possuem, mas também da distância real que os separa.

Igualmente, como tinha sido referido e explicado no cap. 2, a matriz L , à semelhança das matrizes C e T , só se esgota (deixa de ter zeros) quando elevada à potência igual do diâmetro da rede ($L^1, L^2, L^3, \dots, L^n$), o que significa que a execução completa dos procedimentos analíticos vai gerar um grande número de matrizes com um grande volume de informação, as quais se apresentam em anexo. Contudo, tal como na análise às matrizes C , T e D para as redes dos vários períodos considerados, faz-se a exposição dos quadros que apresentam a hierarquia dos 20 lugares mais acessíveis e menos acessíveis.

Refere-se ainda que se optou por apresentar aqui os valores ponderados²², a fim de facilitar a legibilidade dos resultados.

Na tabela 18 apresenta-se a hierarquia das acessibilidades dos lugares da rede de Estradas Romanas (cf. Tabela 18²³).

²² A ponderação efectuada consistiu na divisão de todos os valores calculados pelo valor mínimo da matriz respectiva, o que dá indicação de quantas vezes os outros valores são o valor mínimo, que ponderado é 1.

²³ Para a rede de Estradas Romanas, o coeficiente K corresponde a 4401.74 m, que é a estrada que liga Almeirim a Alpiarça.

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade L |
|---|-------------------------------------|----------------------------|
| 1 | Aritium Vetus (Alvega) | 1.000 |
| 2 | Alpiarça | 1.008 |
| 3 | Tubucci (Tramagal) | 1.020 |
| 4 | Almeirim | 1.044 |
| 5 | Marateca | 1.082 |
| 6 | Águas de Moura | 1.086 |
| 7 | Caetobriga (Setubal) | 1.091 |
| 8 | Salatia | 1.093 |
| 9 | Scallabis (Santarem) | 1.100 |
| 10 | Talbriga (Branca) | 1.106 |
| 11 | Seixal | 1.111 |
| 12 | Salacia (Alcacer do Sal) | 1.113 |
| 13 | Cale (Gaia) | 1.115 |
| 14 | Lancobriga (Fiães da Feira) | 1.117 |
| 15 | Limia (Ponte de Lima) | 1.118 |
| 16 | Praesidio | 1.120 |
| 17 | Bracara (Braga) | 1.121 |
| 18 | Equabona (Coima-a-Velha) | 1.122 |
| 19 | Sellium (Tomar) | 1.124 |
| 20 | Montemor-o-Novo | 1.126 |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> | | |
| 65 | Myrtilis (Mértola) | 1.224 |
| 66 | Fines (Corte de Messangil) | 1.229 |
| 67 | Santa Clara-a-Velha | 1.233 |
| 68 | Ponte de Sor | 1.237 |
| 69 | Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs) | 1.239 |
| 70 | Compleutica (Cova da Lua) | 1.240 |
| 71 | Nova Civitas Aruccitana (Moura) | 1.268 |
| 72 | Emerita (Mérida) | 1.269 |
| 73 | Arucci Vetus (Aroche) | 1.280 |
| 74 | Assumar | 1.282 |
| 75 | S. Bartolomeu de Messines | 1.284 |
| 76 | Coruche | 1.285 |
| 77 | Abelterium (Alter do Chão) | 1.292 |
| 78 | Ad Septem Aras (Campo Maior) | 1.304 |
| 79 | Portus Hannibalis (Portimão?) | 1.306 |
| 80 | Lousa | 1.314 |
| 81 | Lacobriga (Lagos) | 1.320 |
| 82 | Ossonoba (Faro) | 1.403 |
| 83 | Balsa (Tavira) | 1.426 |
| 84 | Baesuris (Castro Marim) | 1.468 |
| 23 | Olisipo (Lisboa) | 1.129 |

Tabela 18 – Hierarquia dos lugares, a partir da Matriz de acessibilidades L⁴² da rede de Estradas Romanas.

Dos lugares que eram mais acessíveis, do ponto de vista topológico pela matriz de caminhos-mais-curto (D), apenas 4 permanecem como os mais acessíveis de acordo com a matriz L^{42} , a saber: Águas de Moura, Scallabis (Santarém), Sellium (Tomar) e Montemor-o-Novo, e havendo mesmo 1 lugar (Praesidio) que passa do grupo dos mais acessíveis em termos de distância topológica, para o grupo dos 20 menos acessíveis em termos de maior distância física relativamente aos restantes 83 lugares, o que reflecte uma diferença, neste caso da Rede de Estradas Romanas, entre a topologia da medida de acessibilidade de Shimbel (D) e a geografia da medida de acessibilidade (distância real) L, ou seja que os comprimentos dos arcos são muito diferentes

Da análise comparativa à distribuição espacial dos *grupos* dos lugares mais acessíveis (Figura 52), derivados, quer da matriz D, quer da matriz ponderada L, duas leituras podem ser feitas: alteração da estrutura, com mudança da maioria dos lugares mais acessíveis em D relativamente a L; consequente deslocamento do *grupo* dos mais acessíveis, que deixou de ser zonal, para passar a ser disperso, a norte e a sul do Tejo, mas sempre junto ao litoral.

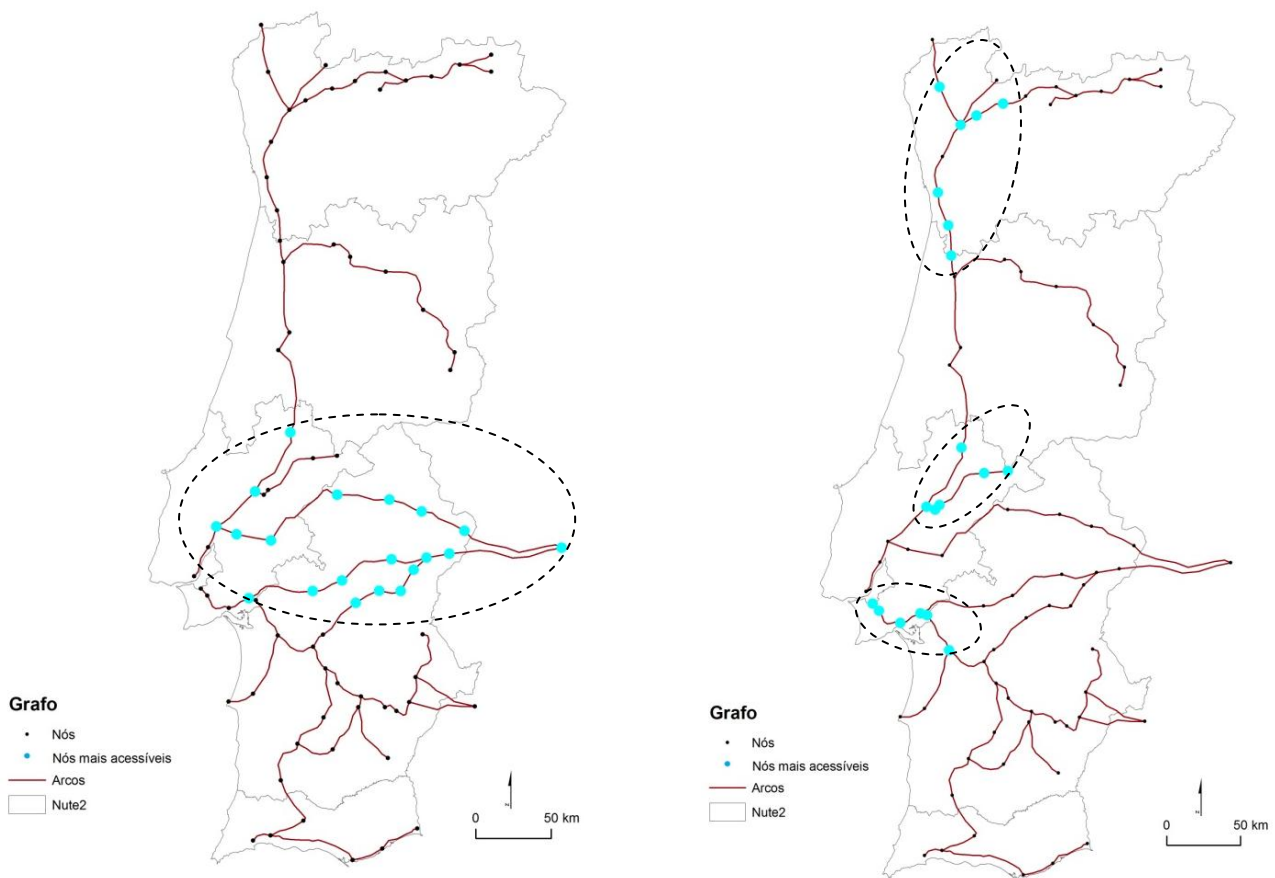


Fig. 52 – Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede de Estradas Romanas, segundo as distâncias topológicas (esquerda) e as distâncias reais (direita).

Os diferentes resultados obtidos evidenciam o facto de nas redes com uma estrutura em árvore, os lugares mais acessíveis serem condicionados, não apenas pela sua posição na estrutura, mas também pela diferente extensão que os diversos arcos apresentam.

Como exemplo, os lugares ao longo da estrada que liga Seixal a Salacia (Alcácer do Sal), são os mais acessíveis a sul do Tejo; a estrada que une Sellium (Tomar) a Almeirim e a Aritium Vetus (Alvega), a norte do Tejo (Lezíria do Tejo) e por fim, o *grupo* composto pelos lugares ligados pela estrada que vai de Talbriga (Branca) a Limia (Ponte de Lima) e a Praesidio, a norte.

Quanto à Rede de Itinerários de 1800, a consideração das distâncias entre os lugares tem influência directa no *agrupamento* dos nós mais acessíveis, quer a partir da medida de distâncias topológicas (D), quer a partir da medida de distâncias físicas (L), cujos resultados podem verificar-se pela tabela 19, no que respeita à ordenação dos lugares.

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade L |
|------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | Ansião | 1.000 |
| 2 | Tomar | 1.001 |
| 3 | Alvaiázere | 1.001 |
| 4 | Madalena | 1.002 |
| 5 | Asseiceira | 1.006 |
| 6 | Abrantes | 1.011 |
| 7 | Paço | 1.016 |
| 8 | Chancelaria | 1.016 |
| 9 | Ponte de Sôr | 1.019 |
| 10 | Entroncamento | 1.020 |
| 11 | Arraiolos | 1.020 |
| 12 | Torres Novas | 1.020 |
| 13 | Évora Monte | 1.020 |
| 14 | Avis | 1.021 |
| 15 | Sousel | 1.024 |
| 16 | Fátima | 1.024 |
| 17 | Vimieiro | 1.025 |
| 18 | Pavia | 1.025 |
| 19 | Zibreira | 1.029 |
| 20 | Miranda do Corvo | 1.044 |
| - - - - - | | |
| 225 | Moura | 1.345 |
| 226 | Tavira | 1.350 |
| 227 | Covilhã | 1.351 |
| 228 | Zambujal | 1.352 |
| 229 | Vila Real de Santo António | 1.362 |
| 230 | Odeleite | 1.369 |
| 231 | Castro Marim | 1.371 |
| 232 | Chaves | 1.376 |
| 232 | Caminha | 1.384 |
| 234 | Tróia | 1.402 |
| 235 | Cabeceiras de Basto | 1.403 |
| 236 | Alcoutim | 1.410 |
| 237 | Serpa | 1.412 |
| 238 | Vales Mortos | 1.447 |
| 239 | Bragança | 1.467 |
| 240 | Valença | 1.468 |
| 241 | Miranda do Douro | 1.477 |
| 242 | Vimioso | 1.541 |
| 243 | Melgaço | 1.547 |
| 244 | Vieira do Minho | 1.568 |
| 154 | Lisboa | 1.227 |

Tabela 19 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L³¹ da rede de Itinerários, 1800.

O facto de apenas 5 (Montemor-o-Novo; Évora; Santana do Mato e Alvito) dos 20 lugares tidos como os mais acessíveis na matriz D, não estarem entre os 20 mais acessíveis da matriz L^{31} , vem comprovar a existência de uma relação forte entre a topologia da rede e as distâncias reais entre os lugares. Esta é a conclusão que pode ainda ser sublinhada pela representação espacial do padrão gerado pelo *grupo* de ambas as métricas (cf. Figura 53).

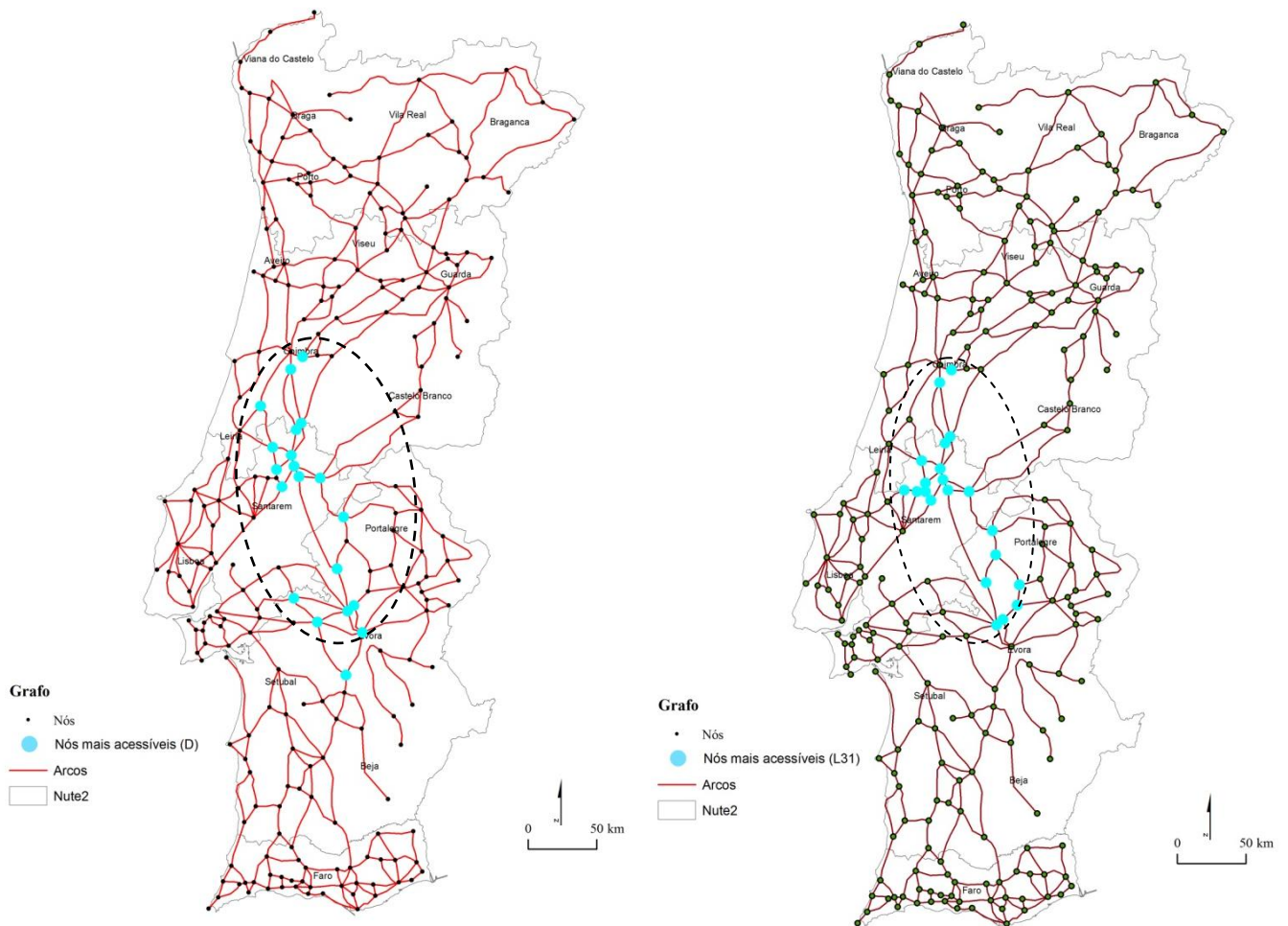


Fig. 53 – Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede de Itinerários 1800, pelas distâncias topológicas (esquerda) e pelas distâncias reais (direita).

Da leitura aos mapas acima constata-se uma similitude espacial assinalada pelas elipses dos *grupos* dos lugares mais acessíveis na rede (Figura 53). Se no caso do mapa da esquerda, referente aos resultados apurados pela matriz D, a localização mais ao centro do *grupo* dos lugares mais acessíveis pode-se explicar pela isotropia do modelo; já no mapa da direita, em que os resultados apurados decorrem da matriz ponderada de distâncias físicas (L) entre os lugares, esta justaposição deve-se a uma conectividade superior a 50% conjuntamente

com um ‘baixo’ diâmetro da rede, ou seja, da relativa igual distância a percorrer para se chegar de um nó a qualquer outro nó da rede, contrariamente ao que acontecia com a rede de Estradas Romanas, dada a sua geometria em árvore.

Para a Rede do PRN45, apesar de se manter uma aparente ocupação geral do território pela rede, face aos Itinerários de 1800, ocorreu uma diferenciação na tanto no padrão concentração, como no padrão dispersão, quer dos nós, quer dos arcos, com destaque para as Áreas Metropolitanas do Porto e de Lisboa, e para o centro do País, na ligação entre Coimbra e Castelo Branco (cf. Figura 39). Nota ainda para o aumento de nós e, sobretudo de arcos, o que traduz um aumento de conectividade da rede (58%). É da combinação destas transformações territoriais e topológicas que se podem explicar as diferenças hierárquicas entre os resultados apurados pela matriz D e pela matriz L³⁷ (Tabela 21).

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade L |
|------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 | Palhota | 1.000 |
| 2 | Amêndoa | 1.001 |
| 3 | Vila de Rei | 1.009 |
| 4 | São João do Peso-Cardigos | 1.010 |
| 5 | Cardigas | 1.014 |
| 6 | Sertã | 1.025 |
| 7 | Mação | 1.025 |
| 8 | Sardoal | 1.034 |
| 9 | Proença-a-Nova | 1.036 |
| 10 | Escalos do Meio | 1.039 |
| 11 | Castelo | 1.040 |
| 12 | Portela do Fojo | 1.043 |
| 13 | Abrantes | 1.044 |
| 14 | Pessegueiro | 1.045 |
| 15 | Góis | 1.045 |
| 16 | Castanheira de Pêra | 1.050 |
| 17 | Gavião | 1.052 |
| 18 | Arganil | 1.052 |
| 19 | Carapinha | 1.053 |
| 20 | Lousã | 1.054 |
| <hr/> | | |
| 370 | Petisqueira | 1.595 |
| 371 | Alcoutim | 1.597 |
| 372 | Monchique | 1.602 |
| 373 | Tunes-Guia | 1.613 |
| 374 | Giões | 1.613 |
| 375 | São Brás de Alportel | 1.615 |
| 376 | Quarteira | 1.628 |
| 377 | Loulé | 1.630 |
| 378 | Silves | 1.631 |
| 379 | Odelouca | 1.643 |
| 380 | Castro Marim | 1.643 |
| 381 | V. Real de Santo António | 1.646 |
| 382 | Faro | 1.647 |
| 383 | Almansil | 1.650 |
| 384 | Olhão | 1.655 |
| 385 | Portimão | 1.658 |
| 386 | Lagos | 1.660 |
| 387 | Tavira | 1.666 |
| 388 | Vila do Bispo | 1.668 |
| 389 | Albufeira | 1.670 |
| 390 | Sagres | 1.710 |
| 204 | Lisboa | 1.177 |

Tabela 20 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L³⁷ do PRN45

O padrão espacial que a anisotropia do modelo traduz através dos resultados apurados pela matriz L, permite evidenciar uma mudança no grupo dos lugares mais acessíveis, face aos resultados derivados da matriz D, com os lugares mais acessíveis alinharem-se pela estrada nº 2, que liga Gavião e Abrantes a Arganil e Carapinha, passando por Sardoal e Proença-a-Nova.

Com efeito, verifica-se uma mudança da disposição espacial do *grupo* dos lugares mais acessíveis, que a elipse representada na figura 54 ajuda a identificar. Trata-se de um alinhamento da disposição dos lugares em torno do IP nº2, facto que se deve, quer à alta densidade da rede, quer ao baixo valor de diâmetro da rede, o que vem explicar a existência de vários caminhos alternativos entre quaisquer pares de nós.

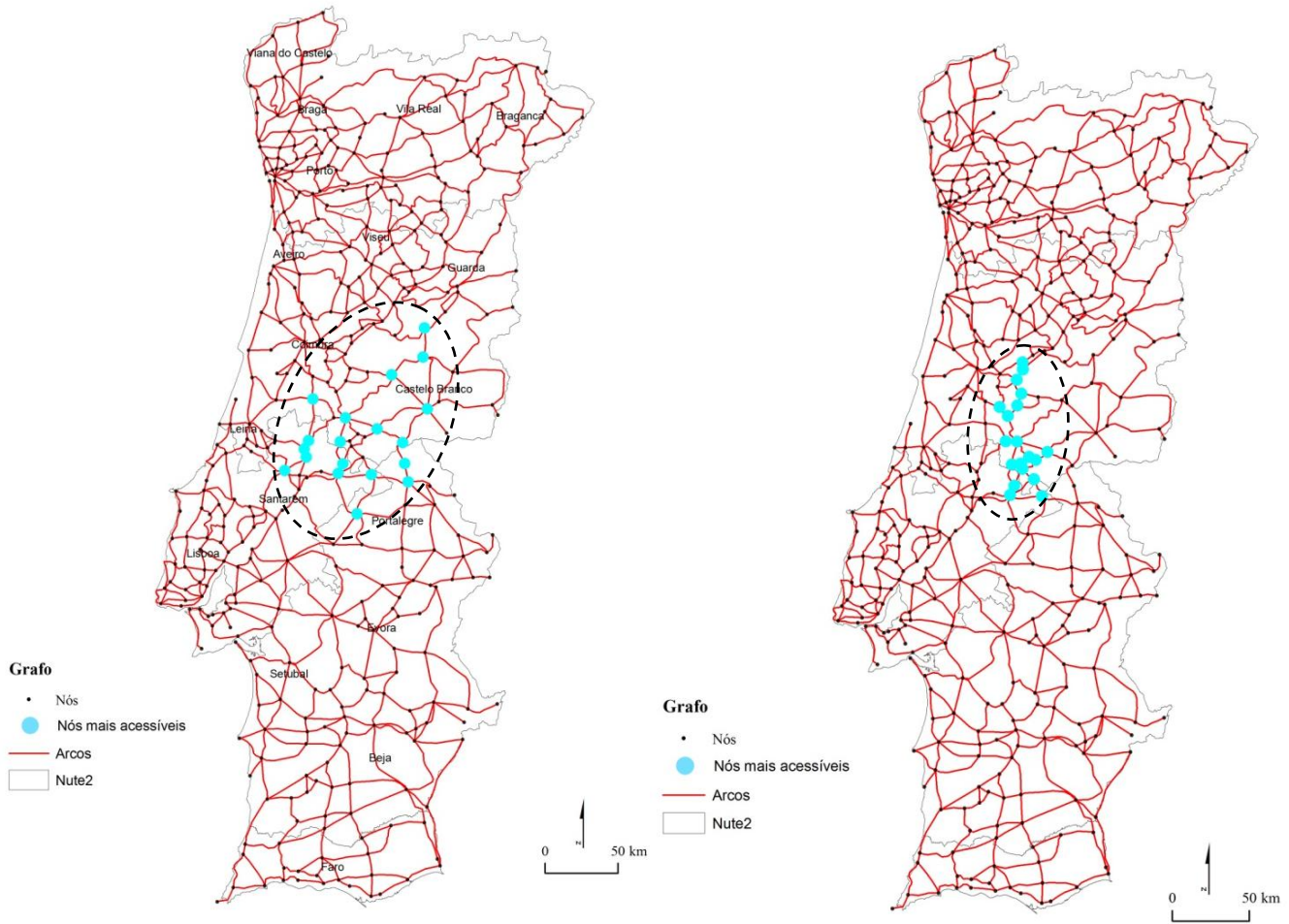


Fig. 54 – Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede do PR45, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L^{37} (direita).

Da leitura comparativa entre as hierarquias de acessibilidade determinadas, entre a matriz D e a matriz L^{37} (Tabela 21), o que se verifica é que apenas 7 (Sertã, Vila de Rei, Sardoal, Abrantes, Castelo, Proença-a-Nova e Gavião) dos lugares mais acessíveis em termos de distância topológica (matriz D) figuram entre os 20 mais acessíveis em termos de distância física (matriz L); e mesmo estes sofreram mudanças de posição mais ou menos significativas.

| Lugar | Ordenação D | Ordenação L ³⁷ |
|----------------|-------------|---------------------------|
| Sertã | 1 | 6 |
| Vila de Rei | 3 | 3 |
| Sardoal | 4 | 8 |
| Abrantes | 9 | 13 |
| Castelo | 13 | 11 |
| Proença-a-Nova | 18 | 9 |
| Gavião | 19 | 17 |

Tabela 21 – Comparação da hierarquia dos 7 lugares que estão simultaneamente entre os mais acessíveis, quer na Matriz D, quer na Matriz L³⁷, do PR45

Passados 40 anos e uma orientação de política rodoviária apostada na desafecção de parte da rede de estradas do poder central para o poder local (DL 380/85), a diminuição da complexidade da rede são as características mais evidentes. Contudo, quando analisado sob as métricas dos modelos propostos, podem-se encontrar padrões e obter respostas que a complexidade da rede muitas vezes encobre.

Para uma boa compreensão da influência do PRN85 sobre o território, a metodologia de análise proposta deve assentar numa abordagem em duas fases: primeiro numa análise comparativa entre o PR45 e o PRN85; segundo, num olhar sobre os resultados do modelo isotrópico (matriz D), com os do modelo anisotrópico (matriz L).

Relativamente à primeira fase, a análise comparativa vem revelar uma alteração do padrão espacial, com a deslocalização para o litoral dos lugares mais acessíveis, conforme deixam evidente as medidas de distribuição espacial. Apesar de as elipses do *agrupamento* dos nós mais acessíveis deixassem adivinhar uma tendência, até à data ainda não se tinha testemunhado.

Com efeito, o *grupo* dos lugares mais acessíveis passou de uma posição geograficamente central (cf. Figuras 53 e 54), para uma posição litoral, alinhando-se junto à costa (cf. Figura 55), o que se pode explicar pelo aumento da importância das ligações existentes no litoral.

O confronto desses resultados com os derivados da matriz L, do modelo anisotrópico, mostra uma segunda alteração original do padrão espacial, e que se traduz na realidade, numa

quebra (não há uma continuidade espacial) entre os lugares que compõem o *grupo* dos mais acessíveis (Figura 55).

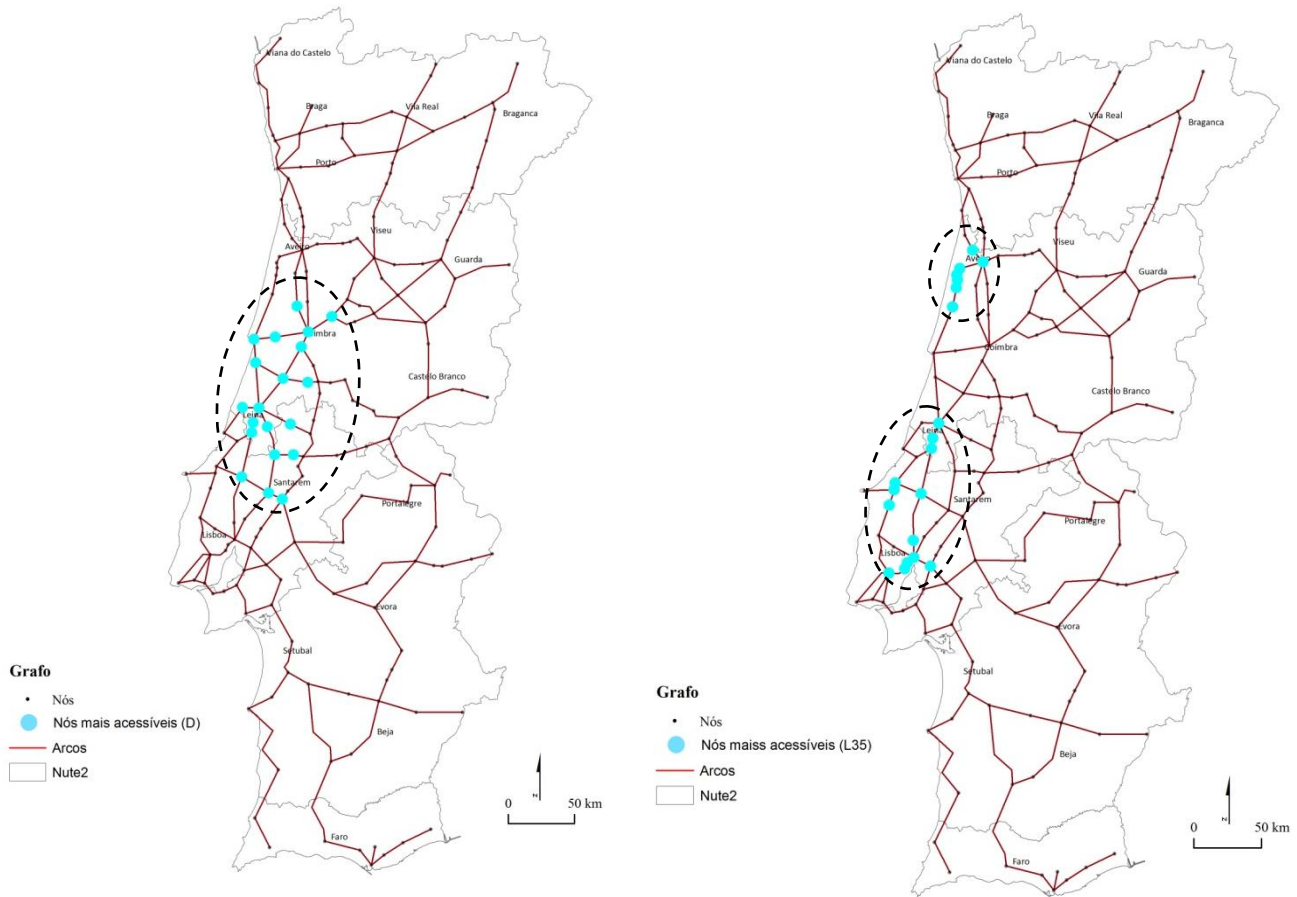


Fig. 55 – Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede do PRN85, pelas distâncias topológicas (esquerda) e pelas distâncias físicas (direita).

De um *grupo* confinado aos lugares dos distritos de Santarém, Leiria e Coimbra (cf. Figura 55, mapa da esquerda), passa-se para dois *grupos*, que não só estão espacialmente desconexos, como passaram a agrupar lugares mais para sul (Sul de Santarém) e mais a norte (Norte de Coimbra), sendo Coimbra o lugar charneira (cf. Figura 55, mapa da direita). Assim, a norte é a IC1 que assiste a ligação entre os lugares de Mira a Estarreja, passando por Aveiro; e a sul são as IC1 e IC2 as estradas que permitem as ligações mais curtas entre os lugares de Loures e Pombal, passando por Caldas da Rainha e Rio Maior, em detrimento de Santarém, que está conectada pela IP1.

A explicação para esta diferenciação de padrões espaciais reside, tal como se vinham verificando para os períodos anteriores, no facto de que à medida que a estrutura da rede vai ganhando conectividade, e consequentemente passam a existir mais caminhos alternativos, a diferença entre as distâncias topológicas e as distâncias físicas vai-se acentuando, com reflexo nos padrões espaciais que configuram.

A análise espacial aos modelos (cujas transformações estruturais foram evidentes) é ainda reforçada pelas mudanças ao nível da relação dos lugares, aferida pelas medidas de acessibilidade e centralidade dos nós da rede (Tabela 22).

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade L |
|------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 | Gafanha da Nazaré | 1.000 |
| 2 | Ílhavo | 1.005 |
| 3 | Vagos | 1.011 |
| 4 | Aveiro | 1.012 |
| 5 | Alverca | 1.046 |
| 6 | Mira | 1.047 |
| 7 | Alhandra | 1.047 |
| 8 | Vila Franca de Xira | 1.049 |
| 9 | Albergaria-a-Velha | 1.050 |
| 10 | Óbidos | 1.060 |
| 11 | Caldas da Rainha | 1.063 |
| 12 | Alenquer | 1.071 |
| 13 | Bombarral | 1.072 |
| 14 | Leiria | 1.073 |
| 15 | Rio Maior | 1.073 |
| 16 | Loures | 1.075 |
| 17 | Estarreja | 1.075 |
| 18 | Samora Correia | 1.078 |
| 19 | Batalha | 1.078 |
| 20 | Porto de Mós | 1.078 |
| <hr/> | | |
| 161 | Ferreira do Alentejo | 1.447 |
| 162 | Sines | 1.449 |
| 163 | Vidigueira | 1.472 |
| 164 | Cuba | 1.475 |
| 165 | Beja | 1.484 |
| 166 | Bragança | 1.486 |
| 167 | Ourique | 1.551 |
| 168 | Serpa | 1.571 |
| 169 | Castro Verde | 1.575 |
| 170 | Odemira | 1.631 |
| 171 | Vila Verde de Ficalho | 1.640 |
| 172 | Aljezur | 1.732 |
| 173 | Albufeira | 1.736 |
| 174 | Lagos | 1.782 |
| 175 | Loulé | 1.797 |
| 176 | Faro | 1.816 |
| 177 | São Brás de Alportel | 1.830 |
| 178 | Olhão | 1.835 |
| 179 | Tavira | 1.870 |
| 180 | Castro Marim | 1.910 |
| 58 | Lisboa | 1.113 |

Tabela 22 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L³⁵ do PRN85

Do confronto entre os resultados apurados a partir da de acessibilidade da matriz D, com a tabela acima, pode constatar-se que apenas 4 dos 20 lugares mais acessíveis se repetem, ou seja, ainda menos que os verificados para o PR45 em análise comparativa. Destaque ainda para o facto de que desses 4 lugares repetidos, a alteração que sofreram na hierarquia foi também superior às mudanças verificadas para os lugares do PR45 (cf. Tabela 23).

| Lugar | Ordenação D | Ordenação L ³⁵ |
|--------------|-------------|---------------------------|
| Leiria | 1 | 14 |
| Batalha | 8 | 19 |
| Porto de Mós | 11 | 20 |
| Rio Maior | 13 | 15 |

Tabela 23 – Comparação da hierarquia dos 4 lugares que estão simultaneamente entre os mais acessíveis, da Matriz D, e da Matriz L³⁵, do PRN85

Significa isto que, quer as mudanças estruturais, quer as alterações em termos de acessibilidade dos lugares, entre os resultados dos modelos isotrópicos e anisotrópico têm vindo a acentuar-se com a evolução temporal da rede de estradas, revelando um diferencial entre a topologia do território e a disposição espacial dos lugares. As alterações nas ligações entre os lugares, com influência, quer na estrutura da rede, quer nas acessibilidades, são a causa principal para esta situação.

Para a rede de estradas do PRN2000 (que segundo o DL 222/98, é um instrumento estratégico de ordenamento do território), quando se comparam os mapas com os lugares mais acessíveis, quer da matriz D, quer da matriz L, o que se verifica é uma alteração total do padrão espacial (cf. Figura 56): passagem de um *grupo* de lugares disperso (Figura 56, mapa da esquerda), ainda que com continuidade espacial, para um *grupo* muito localizado, determinado por distâncias físicas muito curtas (Figura 56, mapa da direita).

Daqui se pode interpretar que o *grupo* dos lugares mais acessíveis, de acordo com a matriz L, não só estão fortemente conectados entre si, mas também com os lugares externos ao *grupo* (cf. 6.3.). Essas ligações são garantidas pelas IC23 e IC24 sobretudo, mas também pela IP1 e IP4, para fora.

O que os resultados da matriz L vêm mostrar é que apesar da perda de complexidade e de densidade da rede (passa de uma densidade de 1.22 em 1985, para 0.36 em 2000), houve um ganho de conectividade, que se manifesta sobretudo entre os lugares que se encontram fisicamente mais próximos entre si.

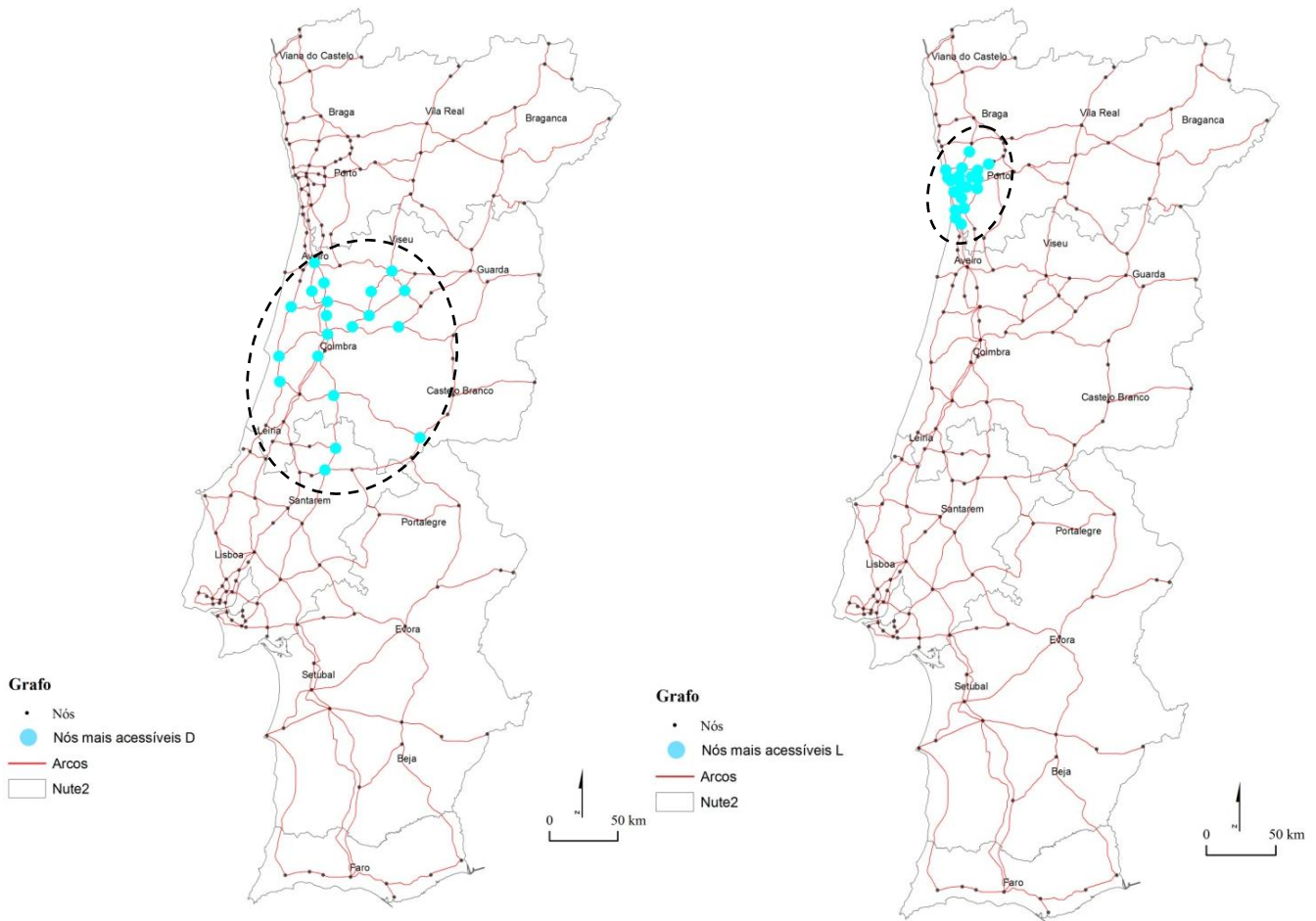


Fig. 56 - Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede do PRN2000, pelas distâncias topológicas (esquerda) e pelas distâncias reais (direita).

As alterações nos padrões espaciais mostram mudanças na hierarquia dos lugares mais acessíveis. De acordo com a matriz D (Tabela 16) e a matriz L (Tabela 24), nenhum dos lugares tidos como mais acessíveis na matriz D, se repetem na matriz L²⁶, dando assim continuidade à tendência que se vinha a verificar: de cada vez, repetem-se menos lugares e acentua-se uma litoralização com o *grupo* dos lugares mais acessíveis a deslocar-se mais para norte, o que é prova de uma maior aposta da densificação da rede de estradas no Noroeste de Portugal continental, mais particularmente na Área metropolitana do Porto e sua envolvente (cf. Figura 26, mapa da direita).

| Ordenação | Lugar | Índice de acessibilidade L |
|---|--------------------------------------|----------------------------|
| 1 | Leça do Balio | 1.000 |
| 2 | Infesta - Porto | 1.000 |
| 3 | Gaia | 1.011 |
| 4 | Porto | 1.012 |
| 5 | Matosinhos | 1.014 |
| 6 | Maia | 1.016 |
| 7 | Canidelo - Gaia | 1.020 |
| 8 | Avintes - Gaia | 1.022 |
| 9 | Valbom | 1.022 |
| 10 | Rio Tinto | 1.025 |
| 11 | Matosinhos - Vila do Conde | 1.028 |
| 12 | Valongo | 1.033 |
| 13 | Lourosa - Faiões | 1.036 |
| 14 | Gondomar | 1.041 |
| 15 | Espinho | 1.043 |
| 16 | Ermesinde | 1.044 |
| 17 | Esmoriz | 1.051 |
| 18 | Sto Tirso | 1.057 |
| 19 | Feira | 1.063 |
| 20 | Paços Ferreira | 1.069 |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> | | |
| 156 | Sines | 1.700 |
| 162 | Bragança | 1.721 |
| 163 | Elvas | 1.753 |
| 164 | Beja | 1.765 |
| 165 | Bragança - Portelo | 1.769 |
| 166 | Caia | 1.771 |
| 167 | Bragança - Rio Frio | 1.800 |
| 168 | Castro Verde - Beja | 1.819 |
| 169 | Ourique | 1.831 |
| 170 | Serpa | 1.870 |
| 171 | Miranda do Douro | 1.890 |
| 172 | Vila Verde Ficalho | 2.007 |
| 173 | Albufeira | 2.072 |
| 174 | Vila do Bispo | 2.108 |
| 175 | Lagoa - Silves | 2.131 |
| 176 | Portimão | 2.160 |
| 177 | Loulé | 2.176 |
| 178 | Vila Real Sto António - Castro Marim | 2.197 |
| 179 | Faro | 2.206 |
| 180 | Tavira | 2.274 |
| 38 | Lisboa | 1.114 |

Tabela 24 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L²⁶ do PRN2000

Mas a análise da rede de ligações rodoviárias, pela matriz L, não é o único método do modelo anisotrópico para análise do efeito da rede de estradas sobre o território. Com o intuito de medir o potencial de interacção entre os lugares, de acordo com a estrutura de relações que as estradas proporcionam e a população residente em cada um dos lugares, adaptou-se o formalismo do modelo gravítico.

6.2.2. Modelo gravítico

Muitas das redes geográficas, com destaque para as redes de ferrovias, as redes de rodovias, as redes de arruamentos, as redes de telecomunicações, entre outras, não podem ser caracterizadas nas suas múltiplas dimensões exclusivamente pela topologia, uma vez que esta ignora aspectos fundamentais como a localização dos nós e a distância entre eles (Batty, 2001; Gorman e Kulkarni, 2004). As redes que se estabelecem no mundo real são o resultado de uma conjugação de características de conectividade, localização e distância geográfica (Xu e Sui, 2007).

O modelo gravítico que aqui se operacionaliza procura formalizar isso, com o Potencial de interacção (P_i) entre os lugares (os nós do grafo) a ser medido em função do rácio entre a população residente e a distância topológica (D) que os separa.

Todavia, antes de se apresentar os resultados do modelo gravítico, é importante responder a algumas questões: em que consiste o modelo gravítico? Como surgiu na Geografia? Que importância assume na análise espacial e qual o propósito para que foi adaptado para análise das redes de transporte rodoviário de Portugal Continental, no âmbito desta dissertação?

O modelo gravítico é o modelo de interacção espacial mais recorrente e de maior expressão em análise espacial (Du, 2001). A partir dele obtém-se o valor potencial de interacção espacial entre os lugares, de acordo com os seus respectivos nós e a distância a que se encontram uns dos outros, de uma forma análoga ao movimento entre elementos de um sistema físico (Nijkamp, 1978). O modelo gravítico para estudo e análise de fenómenos de interacção espacial deriva da adopção e adaptação da teoria da gravidade de Newton (1687),

que postula que a força de atracção de quaisquer dois corpos é proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa.

Formalmente, tal significa que:

$$F_{ij} = \frac{m_i m_j}{d_{ij}^2}$$

em que F_{ij} é a força de atracção entre i e j ; m_i e m_j , as massas dos corpos localizados em i e j , e d_{ij} é a distância euclidiana que os separa.

Este modelo foi adaptado à Geografia para formalizar a interacção espacial. Por interacção espacial considera-se qualquer movimento no espaço resultante da acção humana (Haynes e Fotheringham, 1984), nomeadamente, a migração de população, as deslocações casa-trabalho, a circulação de jornais, o fluxo de passageiros, o fluxo de mercadorias, o fluxo de informação, o conhecimento, ou qualquer outro fenómeno que envolvendo a mobilidade de pessoas, bens, informação, ou ideias de um lugar para outro (Wilson, 2000; Lo e Yeung, 2002).

Apontado como fundamental para a Geografia moderna, porque permite tornar explícito o conceito de relatividade, por oposição à localização absoluta das coordenadas geográficas (Haynes e Fotheringham, 1984), o modelo gravítico teve como primeiros casos empíricos estudados as migrações, com os trabalhos de Ravenstein (1885) e Young (1924). As fórmulas que desenvolveram, com base na teoria da gravidade, tiveram de sofrer algumas alterações, de forma a se ajustarem à realidade em análise. Por exemplo, Ravenstein propôs que a Migração M (número de migrantes) da população P , entre os lugares i e j , fosse obtida a partir da fórmula:

$$M_{ij} = f(P_i)f(P_j)/d_{ij},$$

e retirou o expoente distância d_{ij} , por considerar que o expoente suavizava o efeito de atrito que a variável distância exerce sobre o fenómeno migratório entre quaisquer regiões ou Países, ou seja o efeito de distância é considerada simplesmente como linear (ou

proporcional). Young, por sua vez, introduziu uma constante k , de forma a ajustar o modelo às unidades de medida das variáveis, e manteve o quadrado da distância (já não é simplesmente o efeito da distância, mas da área a que respeita), tal como na fórmula original da lei da gravidade, porque contrariamente a Ravenstein quer verificar se o impacto da distância é proporcional ou não ao grau de interacção espacial, i.e., apesar de se saber que a distância tem sempre um impacto negativo na interacção, podendo nuns casos ser mais ou menos negativa (Haynes e Fotheringham, 1984), segundo:

$$M_{ij} = KP_iP_j/d^2_{ij}$$

Estas duas fórmulas são representativas da maioria das abordagens formais do modelo gravítico (Wilson, 2000), contudo algumas questões reais não ficaram cabalmente respondidas, tais como: Deve-se usar o inverso da distância ou o inverso da distância ao quadrado? Deverão as ‘massas’ ser representadas pela população, ou a população não basta para explicar o potencial atractivo de um corpo em relação a outro? Deverão as massas ser ponderadas ou chegam os valores da variável que representam? E se em vez do potencial de interacção F_{ij} , pretender analisar-se a probabilidade de interacção P_{ij} entre dois ou mais corpos?

Lo e Yeung (2002) consideram que o modelo gravítico originalmente proposto pode e deve ser modificado, de forma a melhor poder analisar e representar os problemas reais de interacção espacial. No geral, as teses propostas caracterizam-se pela interrogação colocada às duas variáveis da fórmula: a variável d ‘distância’ e as variáveis M ‘massa’ (Nijkamp, 1978; Wilson, 2000). Considere-se como exemplo a interacção entre duas cidades i e j , com diferentes contingentes populacionais, P_i e P_j e separadas por uma distância d_{ij} , em que os autores consideram que o potencial de interacção entre as duas cidades T_{ij} , se obtém a partir de:

$$T_{ij} = k \frac{P_i^\lambda P_j^\alpha}{d_{ij}^\beta}$$

A determinação dos valores dos parâmetros λ , α e β diferentes de 1 ou 2 respectivamente, permite adoptar e calibrar melhor o modelo à realidade. Uma outra forma de

melhorar adequação do modelo à realidade consiste numa melhor definição da ‘distância’ a utilizar. Tendo-se partido das distâncias em linha recta nas formulações iniciais, cedo se verificou que não era esta a que melhor representa o tipo de potencial de interacção analisar. A distância física, a distância económica, a distância social, a distância cognitiva, (Gatrell, 1997) ou mesmo a distância topológica, são outro tipo de distâncias, que podem replicar melhor as realidades em análise.

A distância no fenómeno em análise, ter mais ou menos importância, ou causar maior ou menor efeito na interacção espacial dos fenómenos. Por exemplo, quando β é elevado, significa maior influência do factor distância, ou seja quanto maior o parâmetro β , maior é a ‘dificuldade’ de deslocação na rede. Em países ou regiões em que a rede de transportes está bem desenvolvida, o factor distância física tem menor influência sobre a intensidade de interacção entre duas localidades, do que tem num país ou região, com uma rede de transportes mais pobre e menos desenvolvida.

Também no que corresponde à massa M , a população nem sempre é a melhor variável para a considerar. Por exemplo, se o modelo for para análise do fluxo comercial entre regiões, o PIB *per capita* (indicador do poder de compra do consumidor) será uma variável mais ajustada, que a população residente dessa região.

Neste processo de ajustamento do modelo gravítico a fenómenos de interacção espacial, que relevam a imprevisibilidade do comportamento Humano, a transcrição directa do modelo físico de Newton, que até aqui deu resultados estatísticos satisfatórios, deixa de ser suficiente. A fórmula tem de passar a incluir interacção não apenas entre dois corpos, mas de um conjunto de corpos que compõem o sistema (Lo e Yeung, 2002), ou seja o factor ‘oportunidade de intervenção’ e o ‘efeito aglomeração’ têm de ser introduzidos no modelo.

Nesta assunção, deixa de ser o potencial de interacção que importa medir, mas antes a probabilidade de interacção (Nijkamp, 1978), o que traz para a discussão a modelação probabilística, alternativa ao determinismo do modelo gravítico, embora preservando as suas características de interacção espacial. O princípio custo-eficiência (Nijkamp, 1978) é um desses modelos, em que padrões de fluxos com elevados custos são menos prováveis de ser observados que padrões espaciais de fluxos com custos menores.

Haynes e Fotheringham (1984) notam ainda que a estrutura espacial origem-destino é relevante na intensidade de interacção entre os objectos e propõem uma forma mais generalizada do modelo original, a saber:

$$T_{ij} = f(V_i, W_j, S_{ij}),$$

em que, V_i representa o vector origem (atributos de ligação); W_j representa o vector destino (atributos de atracção); e S_{ij} representa o vector de separação (distância, proximidade) entre os lugares, cidades, regiões, ..., i e j .

Para esta dissertação, o método não foi aplicado directamente tal como está consignado nos domínios da física e largamente aplicado em estudos geográficos. Sobre ele fez-se uma adaptação, em que se substituiu a variável distância física entre os lugares, por uma distância topológica (D), já que o fenómeno distância física estava já coberto pela análise da matriz L , pretendendo-se assim obter um modelo mais ajustado à realidade em análise, ou seja, um modelo que considera a influência da acessibilidade não só em função das características topológicas da rede, mas também da população residente²⁴ dos lugares, para medir o potencial de interacção, e mostrar que padrões espaciais se configuram.

Aplicou-se o modelo gravítico a partir de 1940, utilizando os dados recolhidos nesse ano para a população dos lugares, de forma conjugada com a rede do PR45, PRN85 e do PRN2000. O algoritmo baseou-se, uma vez mais, na álgebra de matrizes, em que a construção de uma matriz (a matriz P , em Anexo), e o preenchimento das suas células, resultam da combinação entre a matriz D , das distâncias topológicas, com o campo M (*mass value*) das tabelas de atributos dos nós das redes em análise. Para que não se atingissem valores demasiadamente grandes, normalizou-se o algoritmo de cálculo, com a introdução de um factor K (0.000001), que é um coeficiente de ajuste e simplificação do potencial de interacção (P_i) obtido para cada um dos nós da rede.

Para uma melhor leitura e consequente interpretação dos resultados obtidos, optou-se por fazer a representação gráfica através de um mapa de implantação pontual, com o P_i a ser

²⁴ A população residente por lugares foi obtida a partir dos Recenseamentos Gerais da População para os anos de 1940, 1991 e 2001.

legendado sob a forma de círculos proporcionais²⁵, de forma a assinalar as assimetrias e garantir melhor a percepção dos diferentes padrões espaciais.

Assim, para cada um dos períodos em análise construiu-se um mapa com os respectivos padrões e quadros de hierarquia dos lugares, em função do seu Pi.

Para o PRN45, o mapa do Pi dos lugares (Figura 57) revela uma distribuição espacial bastante equilibrada, consequência de uma rede em forma de malha, com altos indicadores de conectividade e com os lugares a usufruírem de boa acessibilidade, o que permite corrigir desequilíbrios causados pelo contingente populacional, com Lisboa e Porto em destaque, mas também Gaia, Setúbal, Braga, Évora e Coimbra (Tabela 25).

²⁵ Os círculos proporcionais são obtidos do cálculo da raiz quadrada dos valores do Pi que determinam o raio. Ao resultado obtido multiplicou-se por um factor de escala adequado à melhor visualização dos valores (factor 10).

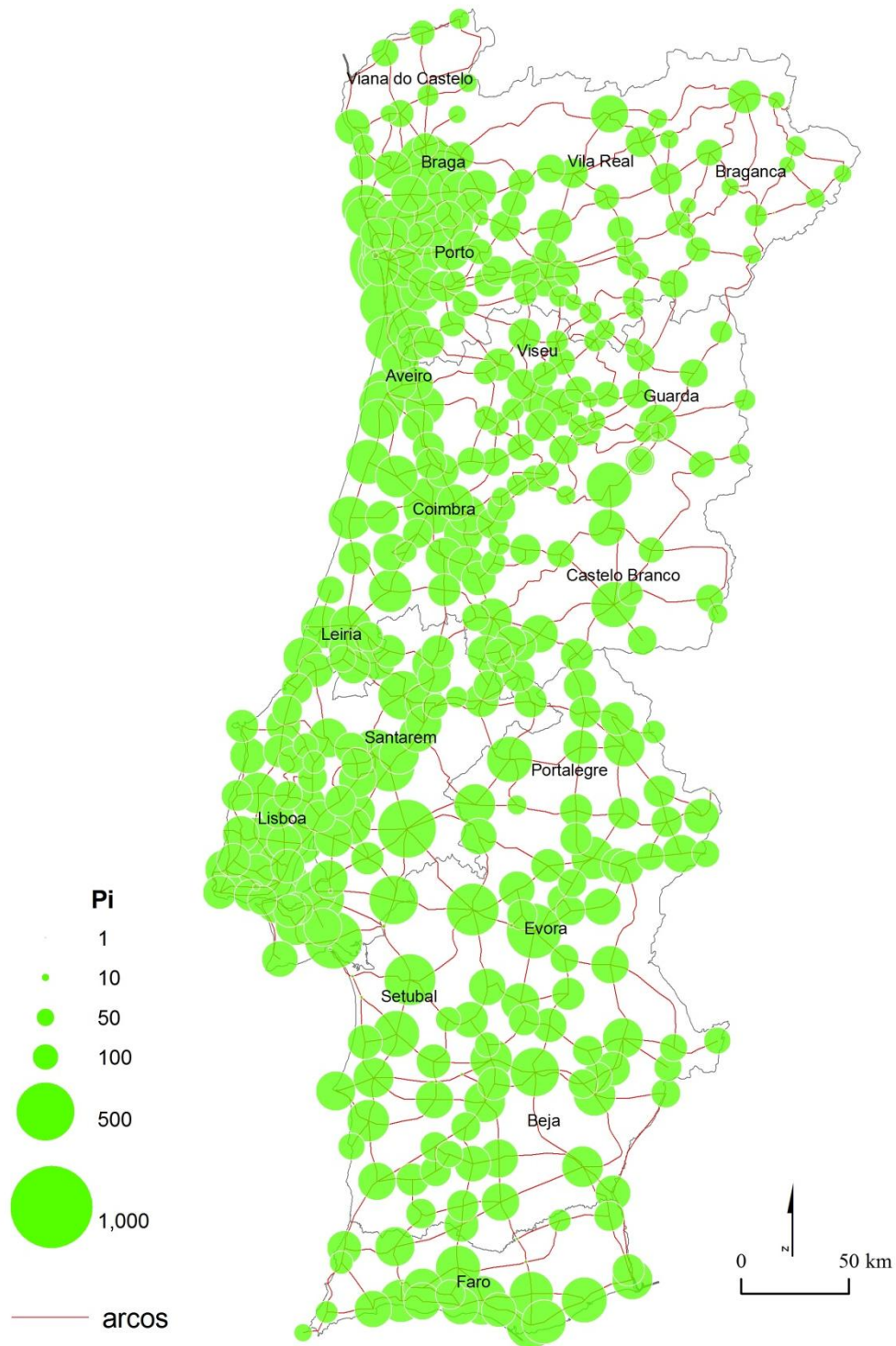


Fig. 57 – Potencial de Interação dos lugares da Rede do PR45

Considerando o Potencial de interação dos lugares, determinados pelos nós do grafo da rede do PR45, dois padrões espaciais se destacam, quer pela localização dos círculos maiores, quer pela densidade de círculos, a saber: uma linha Litoral Ocidental, com uma extensão de cerca de 60km para o interior, e uma linha Sul, na Região do Algarve, com uma extensão de cerca de 30km para o interior.

Menos acentuado, mas espacialmente implícito, é a configuração de um corredor de cidades do Interior (fora do limite do arco litoral a Oeste e Sul), com alto P_i , que se estendem de sul a norte do território, unindo os lugares de Évora, Montemor-o-Novo, Beja, Castelo Branco, Viseu, Estremoz e Portalegre, conforme se pode testemunhar a partir da tabela com a ordenação dos lugares com maior e menor P_i (Tabela 25).

As razões que explicam a configuração espacial dos padrões anunciados devem-se a: valores de população residente altos e de distâncias topológicas curtas entre os lugares; a estrutura em malha da rede e baixo valor do seu diâmetro. Com efeito, uma rede que evidencia um alto valor de conectividade e um diâmetro baixo, mostra uma maior ‘facilidade’ de mobilidade (pessoas, bens, informação, ideias, ...). Características topológicas que, no caso do modelo gravítico que se adaptou, vai retirar factor de atrito e potenciar a influência dos valores da população.

| <i>Ordenação</i> | <i>Lugar</i> | <i>Pi</i> |
|---|------------------------------|----------------|
| 1 | Porto | 8140.50 |
| 2 | Vila Nova de Gaia | 2644.10 |
| 3 | Coruche | 2622.07 |
| 4 | Leça do Bailio | 2423.61 |
| 5 | Setúbal | 2384.87 |
| 6 | Coimbra | 2373.14 |
| 7 | Valongo | 2315.58 |
| 8 | Lisboa | 2032.57 |
| 9 | Évora | 2016.70 |
| 10 | Braga | 1881.81 |
| 11 | Montemor-o-Novo | 1660.52 |
| 12 | Santarém | 1656.05 |
| 13 | Barreiro | 1602.25 |
| 14 | Alcácer do Sal | 1571.81 |
| 15 | Fiães | 1443.70 |
| 16 | Rio Tinto | 1399.42 |
| 17 | Almeirim | 1355.66 |
| 18 | Loulé | 1297.28 |
| 19 | Beja | 1265.43 |
| 20 | Torres Novas | 1250.71 |
| <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> | | |
| 370 | Trindade | 17.22 |
| 371 | Sampaio | 16.03 |
| 372 | Tavares | 15.85 |
| 373 | Lixa | 13.63 |
| 374 | Linda-a-Velha | 0.76 |
| 375 | Matosinhos | 0.32 |
| 376 | Marateca | 0.15 |
| 377 | Évora-São Matias | 0.11 |
| 378 | Atalaia | 0.10 |
| 379 | Ermidas do Sado | 0.08 |
| 380 | Comporta | 0.07 |
| 381 | Odelouca | 0.07 |
| 382 | Barranco Velho | 0.07 |
| 383 | Pinheiro da Cruz | 0.06 |
| 384 | Dogueno | 0.05 |
| 385 | Marinha Grande-S. Pedro Muel | 0.05 |
| 386 | Canhestros | 0.04 |
| 387 | Troia | 0.04 |
| 388 | Ouguela | 0.03 |
| 389 | Mogadouro-Santiago | 0.02 |
| 390 | Petisqueira | 0.02 |

Tabela 25 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz P do PR45

Dos resultados apurados e tendo por comparação o outro método do modelo anisotrópico, da matriz de distâncias ponderadas L, duas conclusões podem-se retirar: 1) não se verificar qualquer semelhança, quer no que respeita a padrões espaciais, quer no que respeita aos lugares cimeiros das ordenações entre os resultados apurados para os dois métodos do modelo anisotrópico, nomeadamente a matriz L e a matriz P; 2) forte semelhança entre os resultados da matriz L, do modelo anisotrópico e os resultados da matriz D, do modelo isotrópico.

A justificação formal para estas diferenças e semelhanças entre resultados apurados e padrões espaciais reside no facto de ter optado por usar a distância topológica como factor de atrito, em vez da distância física, e simultaneamente o facto da população dos lugares não ter mostrar para este ano de 1945, grandes desequilíbrios espaciais.

Para a rede de estradas do PRN85, usou-se como valor da população residente, a do Recenseamento Geral da População de 1991. O P_i (Figura 58) devolve resultados que vêm reforçar a análise anterior. No que respeita aos padrões espaciais que se configuram, destaca-se uma linha de cerca de 60km do litoral oeste que se configurava na rede do PR45, e que agora passou para 50km. Quanto ao eixo dos lugares do interior do País, tornou-se agora mais explícito, e embora continue espacialmente descontínuo, evidencia uma certa resiliência do território face às mudanças operadas ao nível da estrutura da rede.

Quanto ao padrão identificado para o Algarve, a mudança é mais acentuada quando comparada com a rede anterior, com a linha a sofrer simultaneamente um deslocamento, ao passar para uma extensão de cerca de 20km, e a cingir-se apenas ao Sotavento, encurtando Faro e Olhão a sua área de influência gravítica. Tal deve-se sobretudo à desafecção das Estradas (passam para a classe ‘Outras estradas’ no PRN85) que ligavam o eixo Portimão, Lagos, Vila do Bispo.

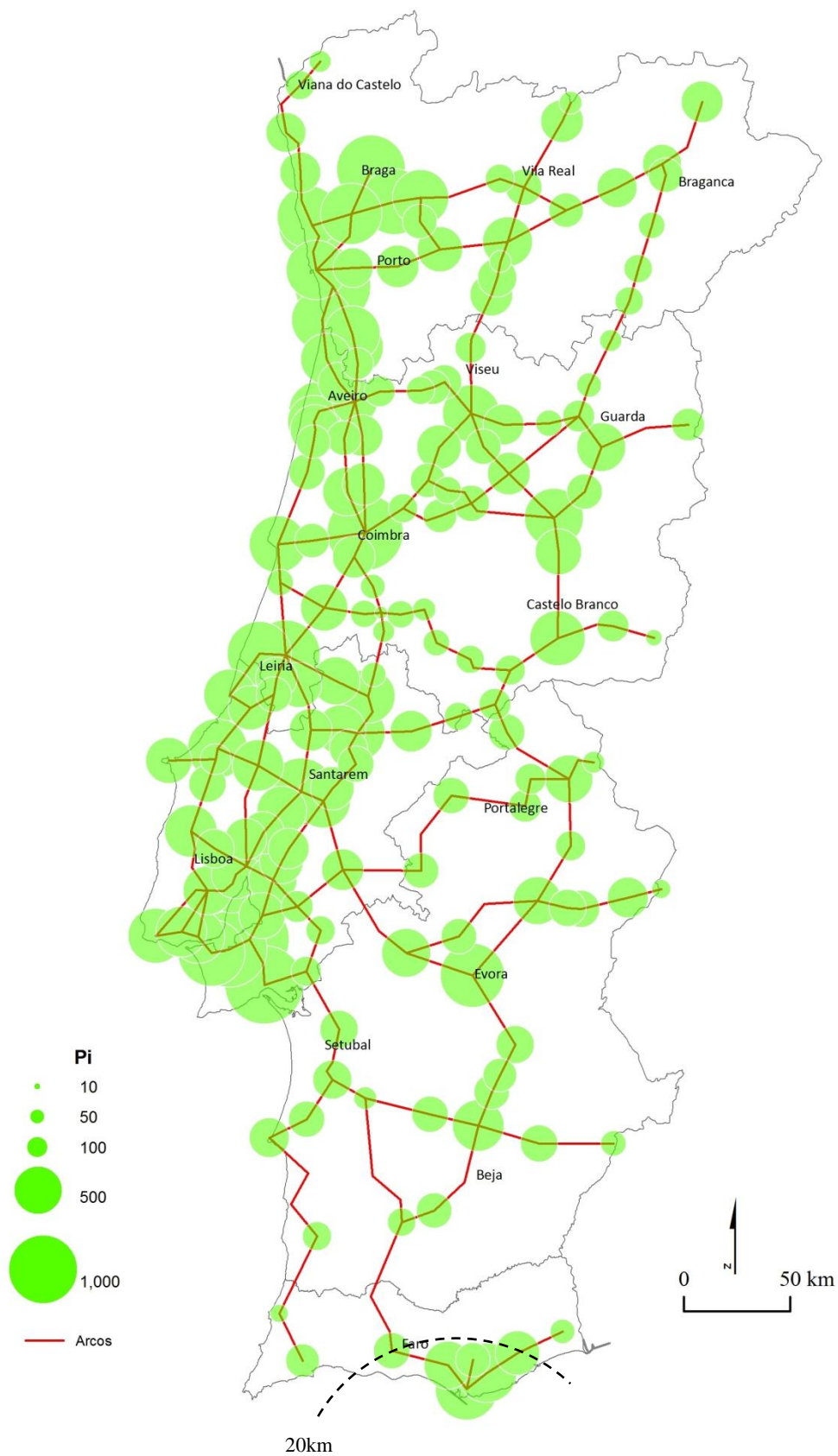


Fig. 58 – Potencial de Interação dos lugares da Rede do PRN85

Ainda numa análise comparativa com os resultados do PR45, o padrão que se destaca denota uma resiliência geral do território, isto é, independente de uma visível alteração da complexidade da rede, os lugares de maior Pi não sofreram grandes alterações das suas posições na ordenação, (cf. Tabela 25 e 26), nomeadamente: Vila Nova de Gaia, que passa da posição 2 (PR45), para a posição 3 (PRN85); Setúbal, que passa da posição 5 (PR45), para a posição 2 (PRN85); Coimbra, que passa da posição 6 (PR45), para a posição 4 (PRN85); Évora, que passa da posição 9 (PR45), para a posição 12 (PRN85), entre outros.

Existem contudo alguns lugares que, por força da diferente estrutura da rede e consequente nova composição (nós e arcos) do grafo, sofreram significativas mudanças de posição na ordenação do Pi, a saber: Lisboa, que se encontrava na posição 8 (PR45), passa para 35 (PRN85); Leiria, que passa de 58 posição (PR45), para a posição 6 (PRN85); Vila do Conde, que passa da 61 posição (PR45), para 8 (PRN85); Guimarães, que passa da 31 posição (PR45), para 11 posição (PRN85) e ainda Espinho, que passa da posição 93 (PR45), para a posição 17 (PRN85). Tais mudanças de posição na ordenação devem-se sobretudo a alterações do valor da população desses lugares entre os anos 1945 e 1985. Com efeito, com a exceção de Lisboa, quer perdeu quase uma centena de milhar de habitantes (INE, RGP 1940 e 1991) e daí a sua descida na ordenação, todos os outros lugares mostraram ganho de população e consequente subida de posição na ordenação, ou seja ganho relativo de acessibilidade face aos outros lugares.

| <i>Ordenação</i> | <i>Lugar</i> | <i>Pi</i> |
|------------------|--------------------------|----------------|
| 1 | Montijo | 3837.61 |
| 2 | Setúbal | 3624.92 |
| 3 | Gaia | 3239.84 |
| 4 | Coimbra | 3184.39 |
| 5 | Barreiro | 3168.73 |
| 6 | Leiria | 2285.99 |
| 7 | Braga | 2143.71 |
| 8 | Vila do Conde | 1970.09 |
| 9 | Almada | 1941.57 |
| 10 | Santarém | 1930.04 |
| 11 | Guimarães | 1863.29 |
| 12 | Évora | 1702.03 |
| 13 | Marinha Grande | 1685.60 |
| 14 | Faro | 1503.94 |
| 15 | Póvoa de Varzim | 1439.50 |
| 16 | Famalicão | 1394.18 |
| 17 | Espinho | 1343.72 |
| 18 | Vila Franca de Xira | 1309.55 |
| 19 | Olhão | 1272.60 |
| 20 | Matosinhos-Porto | 1259.82 |
| 161 | Fornos de Algodres | 50.42 |
| 162 | Sertã | 49.29 |
| 163 | Carriço | 46.84 |
| 164 | Vila Verde de Ficalho | 40.51 |
| 165 | Castro Marim | 39.55 |
| 166 | Penela | 36.64 |
| 167 | Trancoso | 36.58 |
| 168 | Ferreira do Zêzere | 35.95 |
| 169 | Vila Verde da Raia | 28.46 |
| 170 | Pedrógão Grande | 27.63 |
| 171 | Canal Caveira | 26.48 |
| 172 | Marvão | 24.52 |
| 173 | Santa Marta de Penaguião | 23.93 |
| 174 | Alvaiázere | 23.43 |
| 175 | Vila Nova de Cerveira | 22.77 |
| 176 | Sernancelhe | 21.88 |
| 177 | Caia | 12.96 |
| 178 | Aljezur | 11.85 |
| 179 | Segura | 8.00 |
| 180 | Avelar | 2.82 |
| 35 | Lisboa | 803.24 |

Tabela 26 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz P do PRN85

Uma vez mais se verifica que a acessibilidade dos lugares determinada a partir das distâncias físicas mais curtas (Tabela 22), não coincide com nenhum dos lugares com maior potencial de interacção (P_i), o que sublinha a diferença entre distância topológica e distância física. Contudo, ao confrontarem-se os mapas resultantes de ambas as matrizes (Figuras 55 e 58), pode verificar-se que, embora os lugares cimeiros da ordenação de ambas as tabelas não se repitam, o padrão espacial derivado de L, está integrado no padrão espacial correspondente à linha do litoral ocidental, do P_i , o que deixa adivinhar uma maior tendência de aproximação entre os resultados obtidos pelos métodos do modelo anisotrópico, ou seja um maior esbatimento da diferença entre a distância topológica e a distância física no mundo real

Para o PRN2000, contrariamente ao experienciado para a rede do PRN45 e confirmando a tendência do PRN85, verifica-se agora uma maior similitude entre os resultados apurados pelas matrizes L e P, referentes ao modelo anisotrópico, com reflexos evidentes no padrão espacial que se configura (Figura 59), e confirmados por vários lugares a surgirem em lugares similares na ordenação dos 20 iniciais (Tabela 27).

Numa análise comparativa entre os resultados das matrizes D, L e P_i , para o período entre o PRN45 e o PRN2000, aquilo que se verifica é:

- Uma maior similitude entre as matrizes de distâncias topológicas (D) e de distância física (L), e uma maior diferenciação destas com os resultados apurados pela matriz do potencial de interacção (P_i) dos lugares, para o grafo da rede do PRN45, resultado da introdução da variável população na análise do P_i , e que estava ausente das matrizes D e L
- Uma situação de menor afinidade entre D e L, em favor de um ganho de proximidade entre os resultados de L e P_i , para o PRN2000. A introdução deste novo padrão é resultante de duas políticas dos PRN's, nomeadamente a desafecção de algumas estradas de 'Itinerários principais e complementares' para 'outras estradas' e de se privilegiarem as ligações entre lugares mais distantes fisicamente uns dos outros.

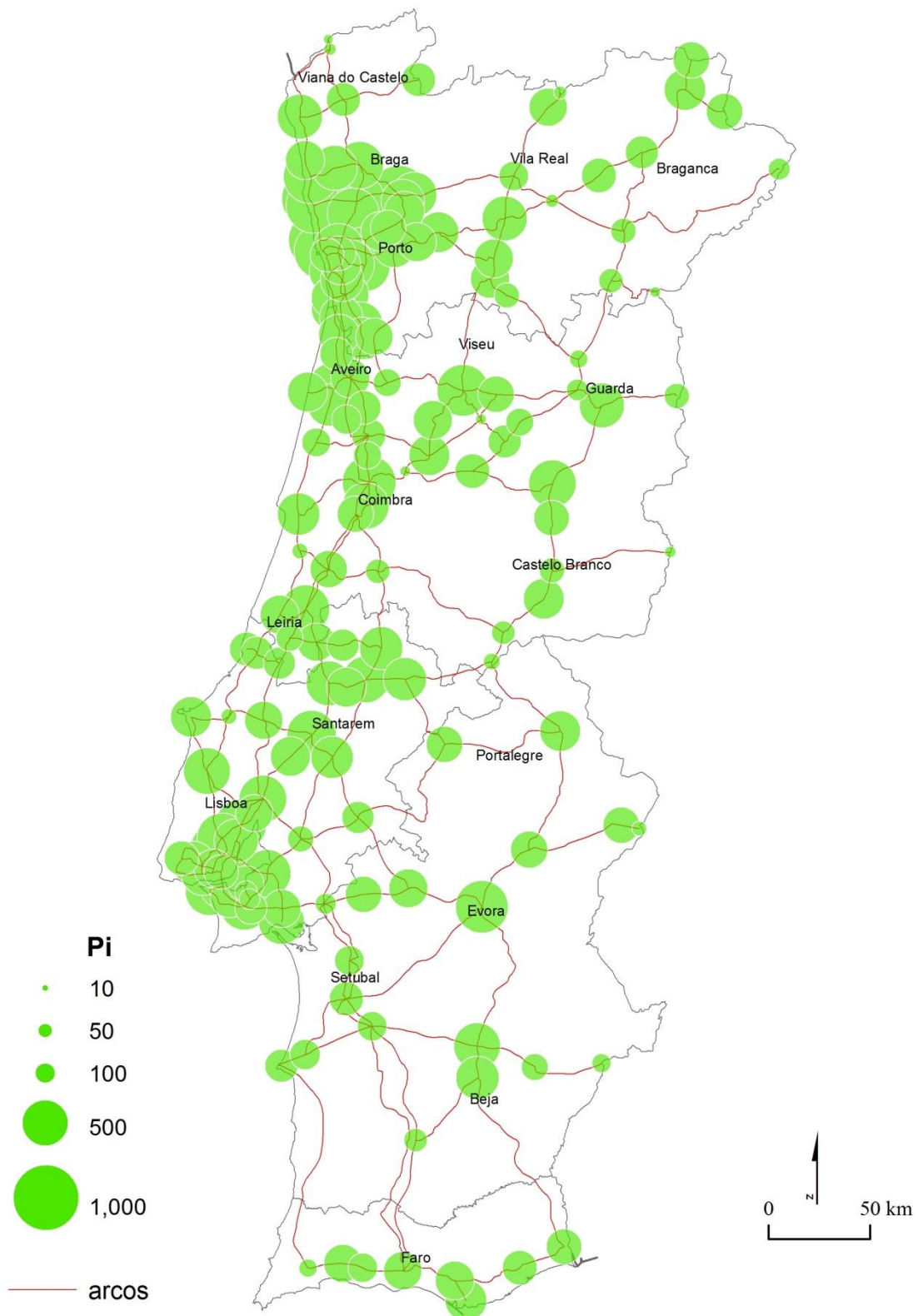


Fig. 59 – Potencial de Interacção dos lugares da Rede do PRN2000

| Ordenação | Lugar | Pi |
|------------|-----------------------------------|----------------|
| 1 | Matosinhos - Vila do Conde | 8023.74 |
| 2 | Maia | 7598.24 |
| 3 | Guimarães | 6399.64 |
| 4 | Ermesinde | 6030.48 |
| 5 | Famalicão | 5780.22 |
| 6 | Matosinhos | 5596.13 |
| 7 | Odivelas | 5311.95 |
| 8 | Póvoa de Varzim | 5202.13 |
| 9 | Vila do Conde | 5199.60 |
| 10 | Póvoa de Varzim - Esposende | 4779.15 |
| 11 | Rio Tinto | 4715.31 |
| 12 | Coimbra - Mealhada | 4432.29 |
| 13 | Aveiro | 4336.44 |
| 14 | Évora | 4255.75 |
| 15 | Viseu | 3966.36 |
| 16 | Sto Tirso | 3952.28 |
| 17 | Valongo | 3942.63 |
| 18 | Gondomar | 3813.80 |
| 19 | Ramada | 3784.60 |
| 20 | Alverca | 3661.70 |
| <hr/> | | |
| 156 | Palhais | 151.45 |
| 162 | Celorico da Beira | 121.04 |
| 163 | Miranda do Douro | 119.28 |
| 164 | Marateca | 112.85 |
| 165 | Coina | 104.85 |
| 166 | Vila Verde Ficalho | 74.96 |
| 167 | Vila do Bispo | 68.93 |
| 168 | Trancoso | 65.09 |
| 169 | Barragem do Fratel | 44.14 |
| 170 | Carriço | 37.23 |
| 171 | Óbidos | 32.86 |
| 172 | Caia | 31.12 |
| 173 | Murça | 17.94 |
| 174 | Vila Verde da Raia | 16.81 |
| 175 | nó Valença | 12.21 |
| 176 | Monfortinho | 10.18 |
| 177 | Barca de Alva | 8.85 |
| 178 | Penacova | 7.91 |
| 179 | Nelas | 7.17 |
| 180 | Valença | 6.32 |
| 116 | Lisboa | 776.12 |

Tabela 27 – Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz P do PRN2000

Da leitura do mapa (Figura 59) verifica-se que, embora os padrões espaciais se mantenham tal como nos PR45 e PRN85, existem contudo algumas alterações na configuração do padrão. A linha litoral ocidental aparece agora mais sinuoso e menos linear, com recuos no Distrito de Coimbra, e extensões para o interior, junto às Áreas Metropolitanas do Porto e até Guimarães, a norte, e a Área Metropolitana de Lisboa até Santarém, a sul.

Quanto ao litoral sul, o padrão que o Pi mostra, configura-se num eixo de relação dos lugares do Sotavento e do Barlavento, sempre mais junto à costa em detrimento do interior. Estes são padrões que revelam uma estrutura da rede que privilegia o litoral e as ligações entre as principais cidades.

Menos modificado está o padrão do corredor Interior, que continua a mostrar forte resiliência às alterações de geografia e topologia, com os lugares de Beja, Évora, Estremoz, Portalegre, Ponte-de-Sôr, Castelo Branco, Guarda, Viseu, Peso da Régua, Vila Real e agora também Bragança, a acentuarem as suas posições na hierarquia, abafando a capacidade gravítica dos restantes lugares do Interior (cf. Tabela 27 e Anexo). Quanto aos lugares de Miranda do Douro, Barca de Alva, Vilar Formoso, Monfortinho, Caia e Vila Verde de Ficalho, as suas excentricidades espaciais, reforçadas pela menor acessibilidade e baixo valor da população aí residente, determinam o seu baixo Pi.

Numa análise mais local, verifica-se um alargamento da expressão espacial do Pi de lugares da periferia do Porto, onde a coesão é relativamente maior, até Norte (Viana do Castelo, Guimarães, Famalicão), e para Sul (Coimbra, Mealhada), todos ligados pela IC1, IP1 e IC2, num contínuo ininterrupto. É ainda a norte, que mais se nota o reforço do Pi dos lugares que compõem o polígono transversal litoral/interior (Aveiro, Coimbra, Guarda e Viseu).

Mais a sul, por comparação, a expressão espacial do Pi da Área Metropolitana de Lisboa é curiosamente radiada a partir de Odivelas (cf. Figura 59), Tal deve-se, conforme o formalismo de cálculo do Pi deixa antever, sobretudo às características topológicas regionais, que consistem nomeadamente numa maior acessibilidade entre os lugares a norte (existe um anel rodoviário que garante baixas distâncias topológicas entre todos os lugares) e também a maiores valores relativos da população desses lugares. A sul, as ligações rodoviárias

privilegiam as ligações mais distantes, o que influencia determinantemente o Pi desses lugares, não obstante aí se localizarem alguns dos 20 mais populosos lugares, nomeadamente Lisboa, Amadora, Costa da Caparica, Almada e Setúbal.

6.3. O Problema ‘Mundo pequeno’ para análise da eficácia e vulnerabilidade da rede de transportes rodoviários

As métricas da Teoria dos Grafos para estudar e medir as características estruturais das redes não se esgotam nos algoritmos de Kansky e Shimmel. No final do séc. XX, impulsionada pela incursão das redes pelos mais variados sistemas e domínios (quer do saber, quer do negócio) e pela internet, surge uma ‘nova ciência’: a ciência das redes (Barabási, 2003; Dorogovtsev e Mendes, 2003; Bersini, 2005; Watts, 2004), com novos algoritmos para tentar perceber melhor a realidade estrutural subjacente às estruturas em rede, e por elas descritas.

À medida que muitas das redes espaciais, que os geógrafos estudam, de estradas, de ferrovias, de telecomunicações, de saneamento, entre outras, foram adquirindo maior dimensão, por aumento do nível de conforto e de qualidade de vida das sociedades, deixou de ser possível a monitorização às suas dinâmicas de uma forma evidente e manual. O desenvolvimento da computação e a ubiquidade da internet por todos os domínios da sociedade e da ciência e tecnologia veio permitir não só a integração da algoritmia da Teoria dos Grafos nos modelos geográficos de base matemática, mas também o desenvolvimento de novos métodos e algoritmos. O Problema ‘Mundo pequeno’ é um desses exemplos, cujas métricas vêm ajudar a melhor compreender a implicação das redes no território, bem como ajudar à exploração da evolução estrutural das redes em contexto espacial (Xie; Levinson, 2006).

Estudos acerca das redes complexas e das propriedades ‘Mundo pequeno’ das redes têm recebido especial atenção nos últimos anos (Watts e Strogatz, 1998; Strogatz, 2001; Batty, 2001; Barabási *et al*, 2002, 2003; Watts, 2004; Xu e Sui, 2007), com físicos, matemáticos e sociólogos com formação matemática a criarem medidas e modelos capazes de avaliar as propriedades estruturais das redes, e a prever os seus comportamentos. Uma rede ‘Mundo pequeno’ é uma rede que se encontra, quer do ponto de vista do modelo

representacional, quer da sua estrutura e das propriedades dos seus arcos e nós, a meio caminho entre as chamadas redes regulares²⁶ e redes aleatórias (Watts; Strogatz, 1998; 2004).

Do ponto de vista métrico, as análises empíricas denotaram que as redes ‘Mundo pequeno’ são caracterizadas por apresentarem simultaneamente altos índices de acessibilidade, ou seja, baixos valores de caminho-mais-curto (D), o que é próprio das redes aleatórias, e um elevado coeficiente de *clustering* (Cc), típico das redes regulares. A conjugação destas duas medidas, vem possibilitar uma nova perspectiva da influência das redes sobre o território (Jiang, 2006; Xu; Sui, 2007), permitindo medir e avaliar a densidade de conexões na vizinhança de um nó, a eficácia da estrutura da rede (facilidade de fluxo entre os diferentes nós da rede), e a sua vulnerabilidade (importância das ligações na conectividade da rede). (Watts e Strogatz, 1998; Dorogovtsev e Mendes, 2003; Watts, 2004).

Para grafos planares²⁷ e não-orientados, o Coeficiente de *clustering* (Cc) de um nó *ni* vem traduzir a densidade de conexões na vizinhança desse nó. É medido de acordo com o rácio entre as ligações que os seus vizinhos têm e o total de ligações possíveis entre eles. Formalmente:

$$Cc_i = \frac{\sum k_i}{3(k-2)}$$

em que *ki* é o número de arcos (ligações directas)²⁸ ligados ao nó *ni*, e $3(k-2)$ o número de possíveis ligações (outros arcos) entre todos os vizinhos de *ni*; sendo k, o número de nós vizinhos de *ni*.

O Cc assume valores no intervalo compreendido entre {0, 1}, sendo que 1 significa que todos os nós vizinhos de i estão ligados entre si; e 0, quando não existe qualquer ligação entre os vizinhos de i. Em ambos os casos podem ou não (caso em que existem subgrafos) estar ligados aos outros nós do grafo.

²⁶ Cf. Cap.3.

²⁷ O algoritmo encontrado na literatura da especialidade apenas fazia referência a grafos não planares, pelo que o algoritmo que aqui se aplica é foi adaptado e ajustado, uma vez que se está a trabalhar com redes cujos grafos são planares.

²⁸ Valor retirado da matriz de conectividade C¹ (cf. Cap. 2).

Para análise da totalidade do grafo, o C_c consiste na média dos C_c verificados para cada um dos nós do grafo, ou seja:

$$C_c = \frac{\sum \sum k_i}{3(\sum k - 2)},$$

e surge como uma medida de conectividade e de facilidade de ligação que o grafo permite.

Quanto ao cálculo da medida de acessibilidade D (cf. Cap. 2), o que importa é sobretudo o índice de acessibilidade média de Shimbel (D_t), e não o índice de cada um dos nós da rede (D). Claro que para se obter o índice geral é necessário efectuar-se primeiro a análise individual dos nós da rede.

Índice de acessibilidade de Shimbel (D)²⁹

$$D_i = \sum_{j=1}^n dij$$

Índice de acessibilidade média de Shimbel (D_t)³⁰

$$D_t = \frac{\sum_{j=1}^n dij}{n-1},$$

Assim, seguindo a metodologia adoptada para a análise das redes com base na Teoria dos grafos, far-se-á também agora uma análise faseada pela cronologia das redes, começando pela Rede de Estradas Romanas, passando pela Rede de Itinerários de 1800, Rede do PR45, do PRN85, até à Rede de estradas do PRN2000 (cf. Tabela 28).

²⁹ Que significa a soma das distâncias topológicas de um nó a todos os outros nós do grafo, ou seja indica o número de arcos a percorrer, num caminho-mais-curto, para se chegar de um nó i ao nó j .

³⁰ Que representa a média do somatório das distâncias topológicas de um nó a todos os outros nós do grafo.

| | Cc | Cc100 | Di_t | Di_t100 |
|--------------------|-----------|--------------|-----------------------|--------------------------|
| Romanos | 0.35 | 35 | 1293 | 12.93 |
| Itinerários de1800 | 0.54 | 54 | 2828 | 28.28 |
| PRN45 | 0.57 | 57 | 5201 | 52.01 |
| PRN85 | 0.41 | 41 | 2066 | 20.66 |
| PRN2000 | 0.51 | 51 | 1762 | 17.62 |

Tabela 28 – Medidas Mundo pequeno: Coeficiente de *clustering* e Acessibilidade média de Shimbel

Da leitura da tabela pode verificar-se que existe uma relação entre os valores *Cc* das redes e as distâncias dos nós dessas mesmas redes. Para uma leitura mais clara das propriedades ‘Mundo pequeno’ das redes, ajustam-se e simplificam-se os resultados (*Cc100* e *Di_t100*), referente aos valores de *Cc* e *Di_t* respectivamente, multiplicado por 100, no primeiro caso e, dividido por 100, no segundo caso.

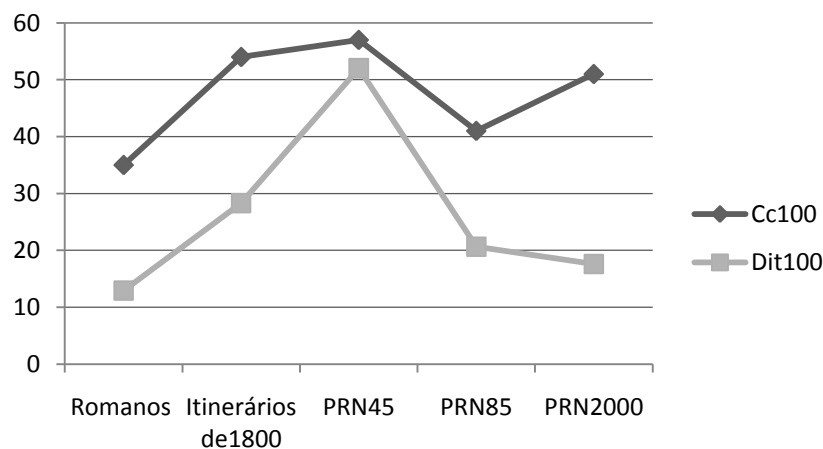


Fig. 60 - Evolução das Propriedades ‘Mundo pequeno, para a Rede de Estradas de Portugal continental

Pela leitura do gráfico de linhas pode verificar-se que a dinâmica das redes de estradas, a partir de uma determinada altura (PRN85), deixa de ser tipicamente regular, (com altos coeficientes de *clustering*), ou tipicamente aleatórias (com baixos índices de distâncias mais-curtas entre os seus nós), para passarem a ser redes ‘Mundo pequeno’, que evidenciam ambas as características, ou seja, um elevado *Cc* e um baixo *Di_t*, conforme o PRN2000 atesta.

Em suma, e atendendo às características ‘Mundo pequeno’ e às implicações que têm sobre o território, a rede de estradas do PRN2000 denota ser uma rede eficaz, na medida em que permite bom fluxo (de informação, bens, pessoas, etc.) ao longo dos seus arcos e com o intuito de servir os nós que a compõem. O alto coeficiente de *clustering* ($C_c > 0.5$) assinala, por sua vez, a boa conectividade dos nós, o que uma relativa facilidade de acesso entre os nós (relativamente baixo D_i), vem demonstrar isso mesmo.

Outra das características estruturais que as redes ocultam, mas que as medidas obtidas pela Teoria dos Grafos e das Redes Complexas mostram é a vulnerabilidade da rede. Apesar de ser uma característica estrutural da rede, a vulnerabilidade da rede obtém-se pela análise individual dos nós, a partir das relações que desenvolvem uns com os outros. Tendo sido originalmente introduzido pela Sociologia (Freeman, 1977), só mais tarde, pela mão dos cientistas físicos (Kim, *et al*, 2002) é que são testados noutras redes, especialmente nas redes da *World Wide Web* e internet (Barabási, 2003).

A medida de vulnerabilidade foi designada por Freeman de *betweenness* (grau de intermediação ou coeficiente de influência) enquanto uma medida de centralidade das Redes Complexas, que permite expressar o controlo, a importância ou a influência de um ou mais nós sobre o fluxo da rede, identificando um ou mais nós responsáveis. Ou seja, a medida determina qual o nó que mais vezes é ‘ponte’ no caminho-mais-curto (caminhos geodésicos) entre todos os nós da rede.

Para verificar qual o nó ou quais os nós com maior influência sobre o fluxo da rede, adoptou-se o algoritmo de Freeman, (B):

$$B_m = \frac{P(i, m, j)}{P(i, j)},$$

Para verificar analisar a totalidade da rede:

$$B = \sum_{i \neq j} \frac{P(i, m, j)}{P(i, j)}$$

em que o número total de caminhos mais-curtos entre os nós i e j é $P(i,j) > 0$, e $P(i, m, j)$ significa que na comunicação de i e j , passa-se por m .

Ao adaptar-se mais esta medida das Redes Complexas à Geografia, e em particular às redes das estradas de Portugal Continental, espera identificar-se e medir, qual ou qual(is) o(s) lugar(es), no decurso da evolução da rede de estradas, que mais influência exerceram e, simultaneamente, qual é ou quais são, os que maior vulnerabilidade trazem à rede. Ou seja, quanto maior o valor obtido, maior é a influência do nó na rede e, ao mesmo tempo, maior a vulnerabilidade da rede, no caso de esse nó ser eliminado de dela.

As tabelas e figuras abaixo permitem, quer a identificação, quer a quantificação do ou dos lugares que maior influência exercem sobre o fluxo da rede. Contudo, e tal como nas medidas anteriores, dado o elevado número de nós e arcos de algumas das redes, apenas se fará aqui nota dos 5 mais influentes, remetendo-se a totalidade das métricas dos outros nós para anexo.

Assim, para a primeira rede (Rede de Estradas Romanas), os lugares ‘ponte’ são:

| Lugar | <i>B</i> |
|------------------------------|----------|
| Scallabis (Santarem) | 1712.00 |
| Arabriga (Alenquer) | 1711.00 |
| Terrugem | 1693.00 |
| Ad Septem Aras (Campo Maior) | 1681.00 |
| Emerita (Mérida) | 1680.00 |

Tabela 29 – Lugares com maior grau de intermediação, segundo as Estradas Romanas

Apesar de se ter destacado os 5 lugares com maior grau de intermediação da rede, são claramente os 2 primeiros (Scallabis e Arabriga) os que maior poder têm no controlo do fluxo da rede, ou seja, são os lugares pelos quais mais vezes se tem de passar para ir de qualquer nó para outro nó da rede, seguindo o caminho-mais-curto. A figura 61, com a georreferenciação dos lugares na rede, ajuda a melhor perceber a relativa disposição destes lugares em relação aos outros.

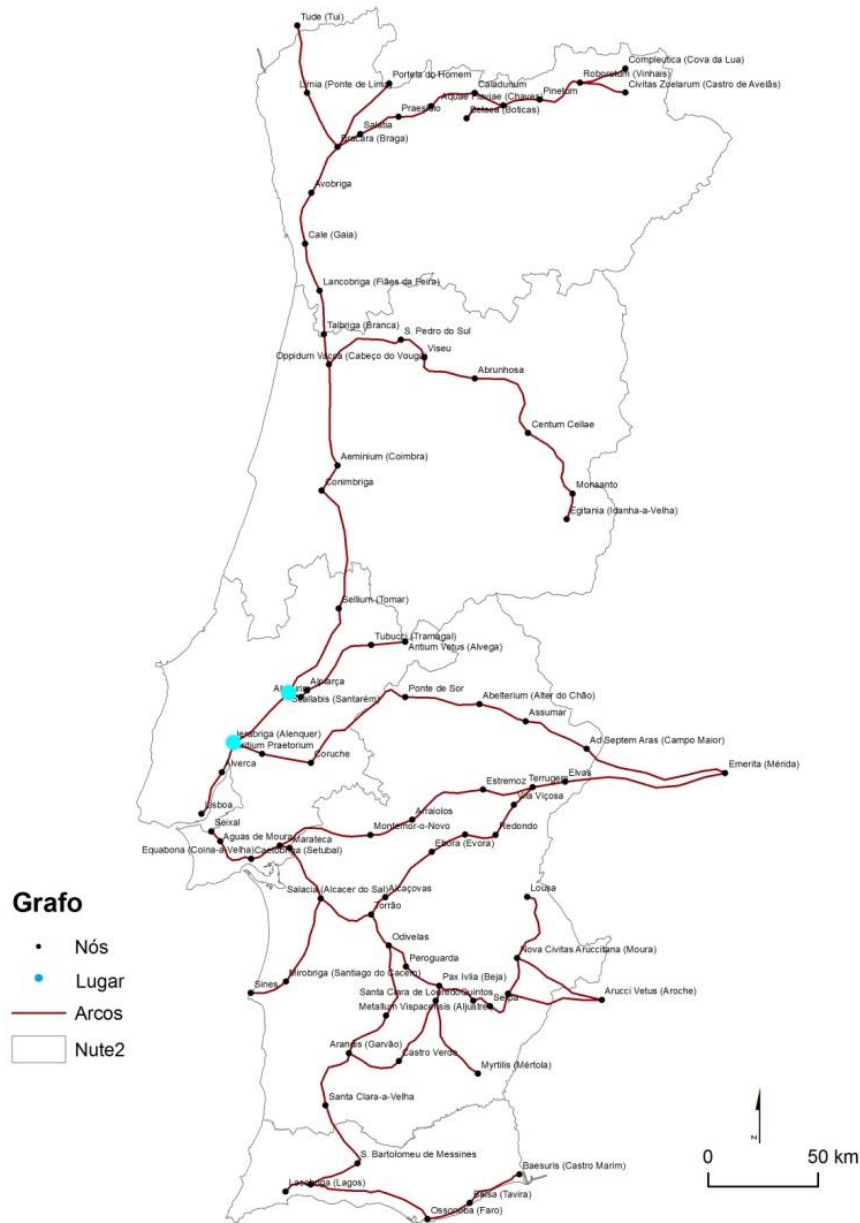


Fig. 61 – Grafo da Rede de estradas Romanas com identificação dos lugares com mais grau de intermediação

Estes resultados indicam ainda tratar-se de uma rede muito vulnerável (cf. 6.4.), pouco complexa do ponto de vista da sua estrutura, com débil organização espacial. A eliminação de um nó da rede leva imediatamente à quebra de fluxo na rede e à criação de sub-grafos.

Chama-se a atenção para o facto de, apesar do algoritmo do caminho mais-curto (D) estar na base de cálculo do índice de Freeman (B), isso não implica que tenha de existir coincidência de lugar, ou seja, que o lugar com maior índice D (o que está mais perto de todos os outros), seja forçosamente o lugar com maior grau de intermediação (B).

No caso das Estradas Romanas, o lugar próximo da rede, relativamente a todos os outros (com maior índice D) é Ad Septem Aras (Campo Maior), enquanto Scallabis (Santarem) é o lugar que é mais vezes nas ligações entre todos os lugares da rede.

É óbvio que se pode também verificar casos em que o lugar mais acessível, segundo D , seja também o que apresenta maior grau de intermediação segundo B . Com efeito, é o que se verifica na Rede de Itinerários de 1800 (Tabela 30), em que os lugares identificados como os com maior grau de intermediação são:

| Lugar | B |
|------------|----------|
| Madalena | 15114.37 |
| Pavia | 13380.63 |
| Arraiolos | 13301.60 |
| Asseiceira | 13180.38 |
| Tomar | 12741.57 |

Tabela 30 – Lugares com maior grau de intermediação, segundo a Rede de Itinerários de 1800

Numa leitura cruzada entre os lugares cimeiros das tabelas D e B , pode comprovar-se que o lugar de Madalena é também o mais acessível entre os outros que constam da tabela 30. Esta situação decorre do facto de se estar na presença de uma rede que predominantemente se assume como regular, ou seja, com elevado coeficiente de *clustering* (graus de conectividade muito semelhante entre todos os nós da rede).

Comparando estes resultados com os obtidos para a Rede de Estradas Romanas, cujos valores de B ponham em evidência dois nós, no caso da Rede de Itinerários de 1800, apenas um lugar (Madalena) se destaca.

Quanto à disposição espacial que ocupa relativamente aos outros lugares que compõem a rede, veja-se a Figura 62 abaixo.

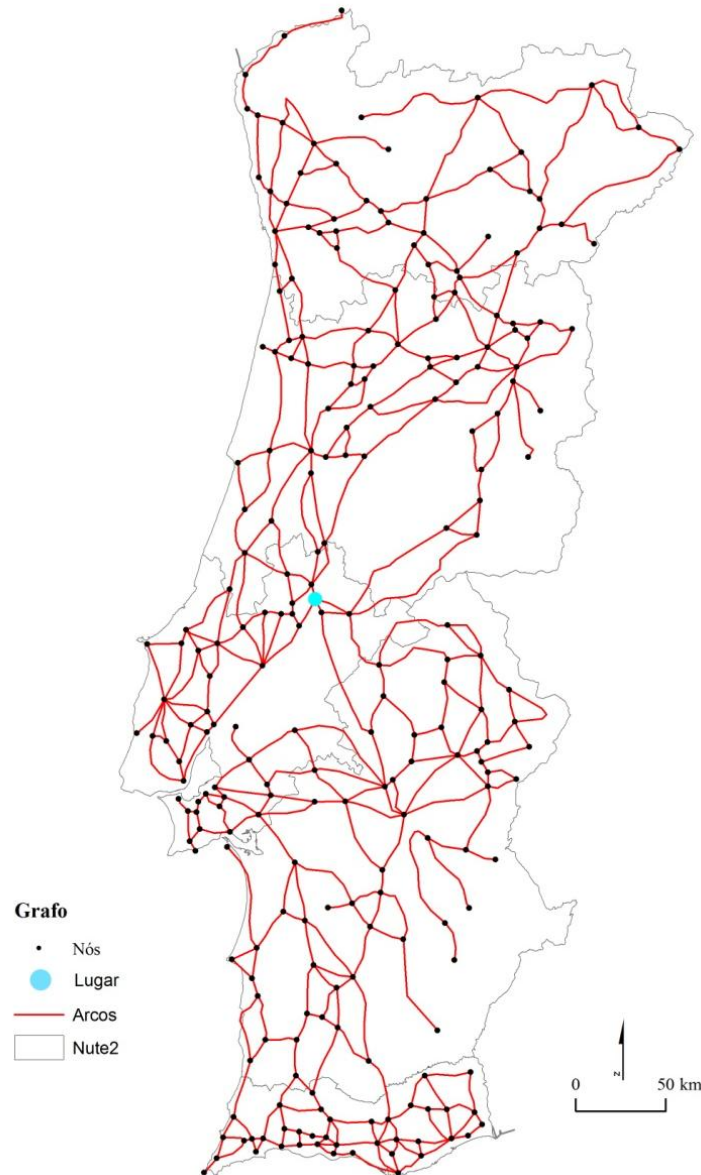


Figura 62 – Grafo da Rede de Itinerários de 1800, com identificação dos lugares com maior grau de intermediação

Considerando a estrutura em malha da rede e uma equilibrada distribuição dos lugares por todo o território encontra-se a justificação para o padrão espacial que mostra uma, maior proximidade física entre o lugar mais acessível (cf. Figura 37 - Madalena), o lugar mais central (Figura 38 - Abrantes) e o lugar mais com maior grau de intermediação (Figura 62 - Madalena).

Para a Rede do PR45, igualmente muito ramificada e com uma boa cobertura do território, os lugares que revelam um maior grau de intermediação são:

| Lugar | <i>B</i> |
|-----------------|-----------------|
| Coruche | 23119.31 |
| Montemor-o-Novo | 17972.18 |
| Fundão | 17513.38 |
| Alpalhão | 16133.83 |
| Castelo Branco | 15897.65 |

Tabela 31 – Lugares com maior grau de intermediação, segundo o PR45

O que se verifica para esta rede do PR45, é que entre os lugares mais acessíveis (evidenciados pela matriz *D*) e os lugares com maior grau de intermediação *B*, apenas o lugar de Castelo Branco, que se posiciona entre os 10 mais acessíveis, surge na tabela dos lugares com maior grau de intermediação, embora com um índice muito inferior. Todos os restantes lugares apresentam agora, relativamente ao número de passagens de caminhos-mais-curtos, valores bastante abaixo dos máximos (cf. Anexo).

Contudo, ao proceder-se ao mapeamento dos resultados devolvidos pelo modelo, o padrão espacial volta a revelar a existência de uma proximidade espacial entre o lugar acessível (Figura 40), com os lugares mais centrais (Figura 41) e de maior grau de intermediação (Figura 63).

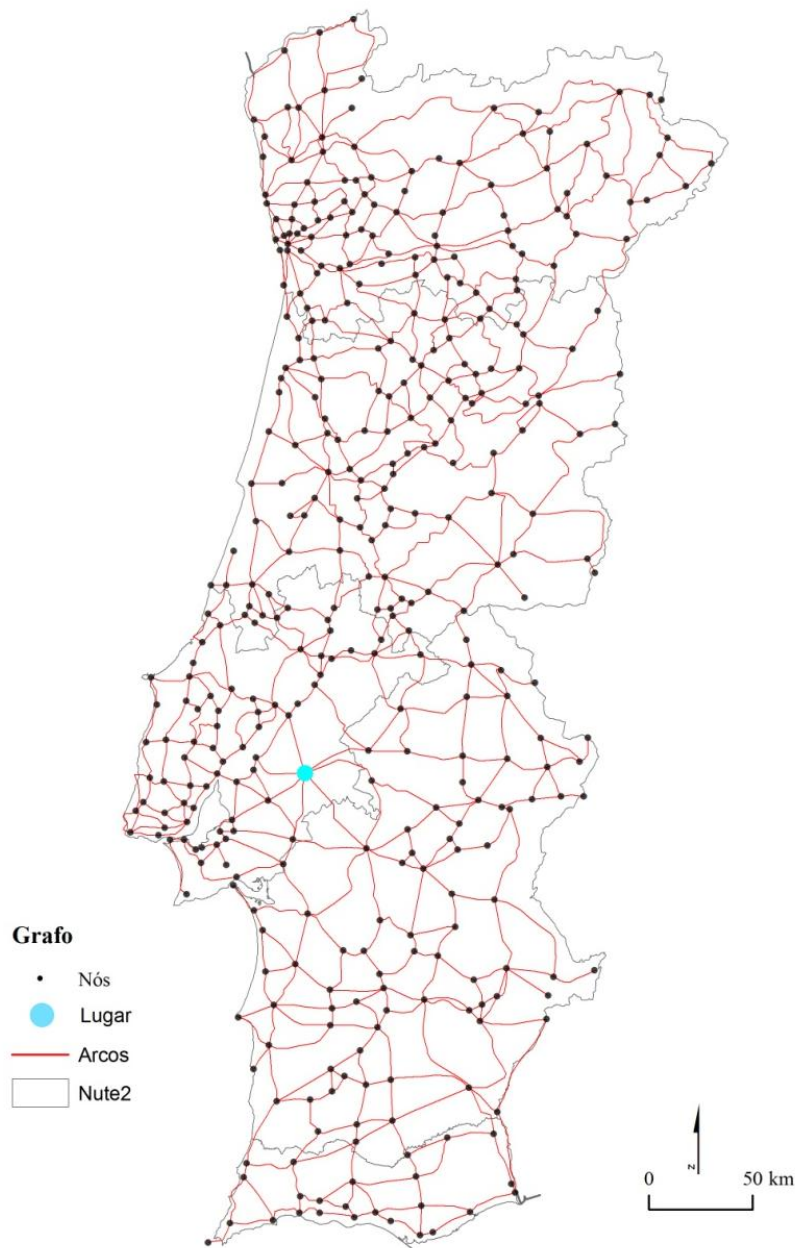


Fig. 63 – Grafo do PR45, com identificação do lugar com maior grau de intermediação

Para o ano de 1985, o Plano Rodoviário Nacional traçado vem uma vez mais revelar a importância da litoralização, na espacialização e estrutura da rede de estradas de Portugal Continental. Da leitura da tabela 32, verifica-se que são os lugares de Coimbra e de Leiria os que apresentam maiores graus de intermediação da rede, logo secundados por Condeixa e Pombal e, embora já com menor peso nas ligações caminho-mais-curto na rede, surge Coruche, que assim continua passados 40 anos, como um dos lugares ‘ponte’ da rede de

estradas, isto é, como um dos lugares pelo qual mais vezes se passa para se movimentar entre lugares na rede de estradas do PRN85

| Lugar | <i>B</i> |
|--------------|-----------------|
| Coimbra | 5541.82 |
| Leiria | 5473.53 |
| Condeixa | 4834.03 |
| Pombal | 4744.40 |
| Coruche | 3901.26 |

Tabela 32 – Lugares com maior grau de intermediação, segundo o PRN85

Se comparados os quadros do grau de intermediação de 1945 com o de 1985, verifica-se que existe uma mudança na hierarquia, cuja materialização no território se manifesta com um movimento de aproximação para o litoral. Destaque ainda para o facto de se verificar a existência de uma semelhança entre os lugares que ocupam o topo da hierarquia dos mais acessíveis (Tabela 15), com os lugares de maior grau de intermediação (Tabela 32) aliás, tal como já se havia constatado através da Rede de Itinerários de 1800.

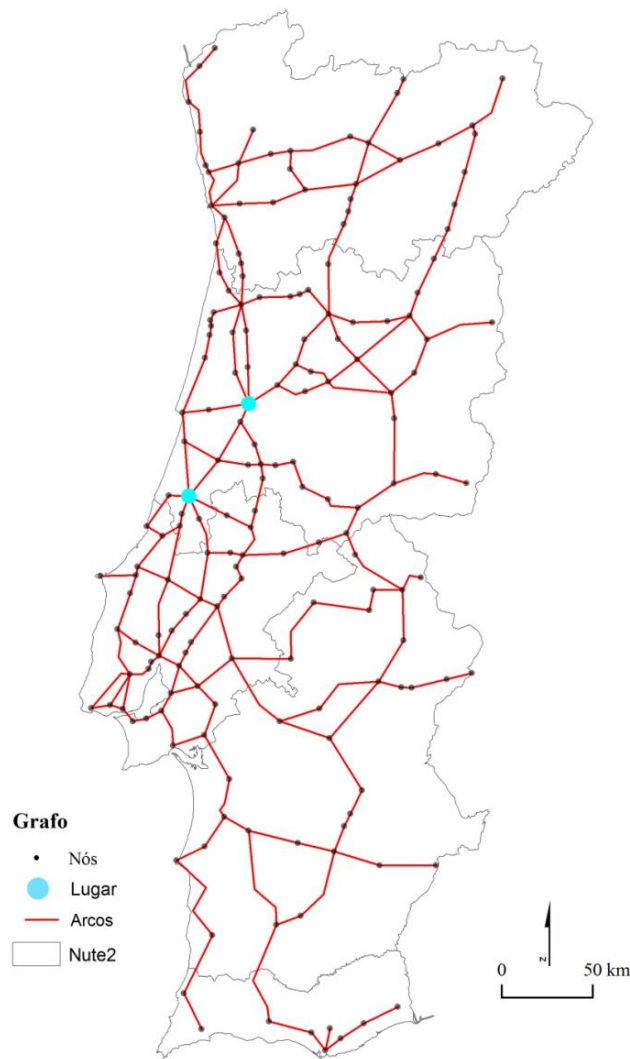


Fig. 64 – Grafo do PRN85, com identificação dos lugares com maior grau de intermediação

A sublinhar o que atrás foi referido acerca da análise comparativa entre os lugares em destaque, atente-se às figuras 43 (do lugar mais acessível), à figura 44 (do lugar mais central) e à figura 63 (do lugar com maior grau de intermediação), que mostram um padrão espacial revelador da existência de maior proximidade espacial entre esses lugares, a saber: lugares mais acessíveis (Leiria, Pombal, Condeixa, Fátima, ...); lugar mais central (Ansião) e lugar com maior grau de intermediação (Coimbra).

No PRN2000, com um aumento do número de arcos e ligeira alteração ao número de nós, foi óbvio o aumento de conectividade (maior C_c) e o encurtamento das distâncias (menor D). Mas que implicações podem essas mudanças provocar na rede em termos de vulnerabilidade da rede e da localização do nó ou nós ‘ponte’ na geografia da rede? E que diferenças ou semelhanças se vão agora revelar entre as principais medidas de análise à estrutura da rede?

| Lugar | <i>B</i> |
|--------------------|-----------------|
| Coimbra | 5688.84 |
| Anadia | 4709.11 |
| Condeixa | 4568.86 |
| Ansião | 4291.94 |
| Albergaria-a-Velha | 3962.07 |

Tabela 33 – Lugares com maior grau de intermediação, segundo o PRN2000

A tabela dos valores do grau de intermediação dos lugares da rede do PRN2000, vem mostrar a tendência que já se adivinhava, tanto pela relação entre os valores obtidos para as outras redes, como pela estrutura da rede quanto à distribuição espacial dos lugares (nós da rede), o que ajudar a explicar uma maior coincidência espacial entre os lugares mais acessíveis (Tabela 16), o nó mais central da rede (Figura 51) e o lugar de maior grau de intermediação (Figura 65).

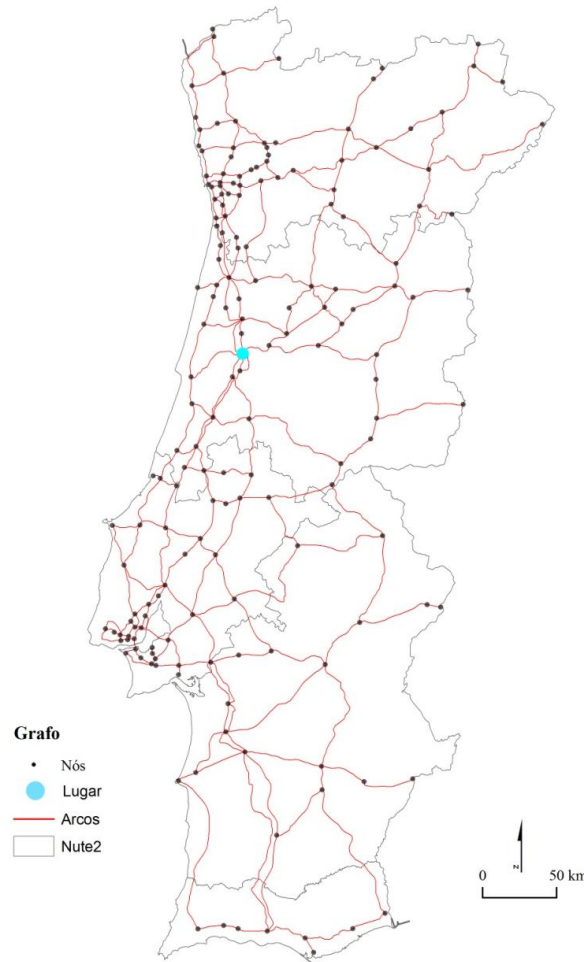


Fig. 65 – Grafo do PRN2000, com identificação dos lugares com mais grau de intermediação

Da análise à figura 64, a expressão geográfica que ressalva é uma maior concentração de arcos e de nós junto do litoral e um vazio a sueste de Coimbra e noroeste de Castelo Branco. Realidade que aliada à única ligação Castelo Branco, Covilhã vem tornar fulcral a posição de Coimbra no contexto das ligações rodoviárias nacionais. Com efeito, se atentarmos bem ao mapa, verifica-se que o PRN2000 adquiriu quase a forma de um ‘laço’, com Coimbra a fazer de nó.

Acerca dos resultados que a medida de Freeman (B) mostra sublinhe-se o facto de que, quanto maior for o valor do grau de intermediação e maior a diferença entre esse valor e os valores obtidos para os restantes lugares, maior é a vulnerabilidade da rede, ou seja maior é a

dependência da rede face ao lugar com maior grau de intermediação. Tentando apontar algumas das consequências da dependência da rede a um lugar, no que respeita à rapidez (caminho-mais-curto) de circulação, destaquem-se os problemas de trânsito, nomeadamente o congestionamento de tráfego, os problemas económicos, que se traduzem na perda de tempo, aumento do consumo de gasolina, no desgaste das viaturas, e na diminuição de produção, os problemas sociais, com reflexo ao nível da saúde dos automobilistas, e os problemas ambientais, mais precisamente o aumento da poluição, tanto da atmosfera como sonora. Em síntese, pode-se afirmar que o grau de intermediação é para a Geografia, uma medida fundamental ao exercício de planeamento e da análise espacial.

6.4. Análise comparativa

Apesar de já se ter vindo a fazer uma leitura comparativa entre as medidas efectuadas, ao longo dos pontos anteriores deste capítulo, existem algumas medidas-chave para a compreensão do efeito das alterações da rede de transportes sobre o território, desde a estrutura viária implantada pelos Romanos até ao PRN2000:

- Medidas estruturais e de conectividade: índice alfa (α), o índice gama (γ), o diâmetro da rede e o coeficiente de *clustering* (Cc) que relembre-se, medem respectivamente o grau de conectividade da rede, através da avaliação do seu estado de maturidade e da influência das relações vizinhas entre os nós na eficiência da rede;
- Medidas de Acessibilidade e centralidade³¹: índice de distâncias mais-curtas (D), o índice de distâncias físicas mais-curtas (L), o Potencial de interacção (Pi) e o grau de intermediação de Freeman (B) que relembre-se, medem respectivamente a facilidade de circulação na rede, o potencial de interacção de um nó relativamente a todos os outros nós da rede e o nó pelo qual mais vezes se tem de passar para nos deslocarmos na rede;

³¹ Como estas são características de cada um dos nós da rede, e dado o elevado número de nós, as tabelas inseridas somente destacam os primeiros 10 nós. As tabelas na íntegra estão nos Anexos.

- Medidas de Distribuição espacial: medida de centralidade e a medida de tendência de distribuição, cujo significado é de mostrar qual a tendência espacial de evolução da rede de estradas e comparar com a rede de cidades

Para as medidas estruturais e de conectividade, a tabela seguinte faz a síntese e permite a comparação dos valores obtidos ao longo do período de evolução das redes de estradas.

| | α | γ | Diâmetro | Cc |
|---------------------|----------|----------|----------|------|
| Estradas Romanas | 0.01 | 0.35 | 42 | 0.35 |
| Itinerários de 1800 | 0.30 | 0.53 | 31 | 0.54 |
| PRN45 | 0.36 | 0.58 | 37 | 0.57 |
| PRN85 | 0.11 | 0.41 | 35 | 0.41 |
| PRN2000 | 0.26 | 0.51 | 26 | 0.51 |

Tabela 34 – Valores das medidas estruturais e de conectividade para as redes de estradas de Portugal continental.

Na análise da tabela, destaque-se a semelhança dos resultados obtidos, para o índice gama (γ), e para o coeficiente de *clustering* (Cc), o que significa que só pontualmente é que as relações de proximidade entre os nós revelam alguma diferença face às relações entre todos os nós. Para além disso, a constituir também nota de referência óbvia é a proporcionalidade que existe entre os índices de conectividade (α), (γ) e (Cc), como de resto é fácil verificar pelo gráfico 2, abaixo, e que significa que se tratam de medidas que acima de tudo se complementam, mais do que diferem. Ou seja, em conjunto permitem ao analista tirar conclusões com maior segurança, do que analisadas individualmente (cf. Cap. 2 e Cap. 3).

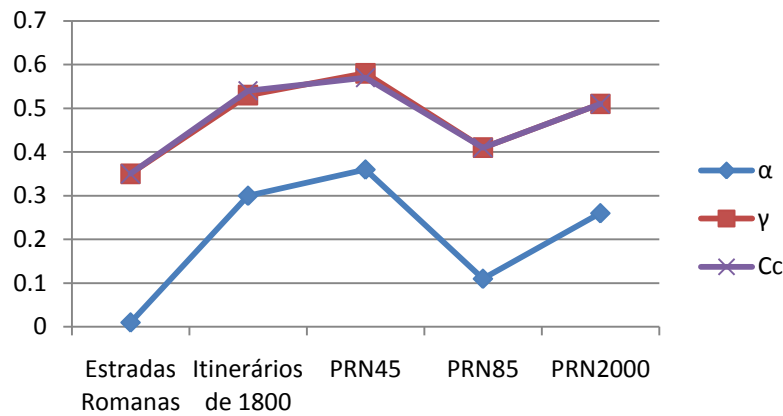


Fig. 66 – Evolução dos índices estruturais e de conectividade das Redes de Estradas de Portugal continental

Numa análise geral das redes, o que estes valores vêm dizer é que se partiu de uma rede de fraca conectividade, desconexa e com uma estrutura em árvore (ou espinha), em que faltam caminhos alternativos para circular entre os lugares (nós) que compõem a rede, para uma rede com índices de conectividade elevados, coesa e com vários caminhos alternativos para ir de um lugar para outro. Nesta perspectiva estrutural, pode afirmar-se que a rede de estradas em Portugal Continental foi gradualmente ganhando uma maturidade cujo reflexo territorial se verificou com uma aproximação geral dos lugares (como mostra a diminuição do diâmetro da rede e o aumento dos restantes indicadores de conectividade) e, consequentemente, um aumento da eficiência da rede, conforme dá indicação o aumento do Cc .

Ainda referente aos indicadores estruturais, que devem ser sempre lidos conjuntamente, conforme se menciona no Cap. 2, pode constatar-se dois períodos-chave: o que antecede o PR45 e o que sucede ao PR45. Até ao PR45 é fácil perceber que a rede foi ganhando conectividade com o contínuo aumento dos índices (α) e (γ); contudo, do PR45 para o PRN85, o que se verificou foi uma diminuição desses mesmos índices (cf. Cap. 2), o que levaria a supor que a rede tinha retrocedido no processo natural de aumento de conectividade e coesão.

Todavia, e tal como atrás se fez referência, estes valores não podem ser lidos isoladamente; o facto de ter existido uma diminuição do indicador de diâmetro da rede,

significa que houve um encurtamento das distâncias entre os lugares mais afastados da rede e, por conseguinte, um ganho de coesão. O território encolheu.

O período marcado pela passagem do PRN85 ao PRN2000 vem reforçar esta conclusão. Com efeito, apesar de uma diminuição da complexidade da rede (menor número de nós e arcos), a estrutura da rede, ou seja, a forma como os nós se ligam uns aos outros através dos arcos aumenta a sua conectividade e coesão, apesar a diminuição do diâmetro da rede, e dos índices (α) e (γ) voltarem a subir.

Quanto à análise interna da rede, as medidas de acessibilidade e centralidade vão mostrar as características individuais dos nós e dos arcos, dando conta, de um modo geral, não só da maior ou menor facilidade de deslocação entre os nós, mas também identificando e hierarquizando quais os nós e os arcos responsáveis pelo ganho ou perda de eficiência da rede. A tabela abaixo (Tabela 35) permite fazer essa leitura, ao longo da evolução temporal das redes.

| | Medida de distância topológica (D) | Medida de distância física (L) | Potencial de interacção (Pi) | Grau de intermediação (B) |
|------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Estradas Romanas | Ad Septem Aras (Campo Maior) | Aritium Vetus (Alvega) | - | Scallabis (Santarem) |
| | Emerita (Mérida) | Alpiarça | - | Arabriga (Alenquer) |
| | Assumar | Tubucci (Tramagal) | - | Terrugem |
| | Elvas | Almeirim | - | Ad Septem Aras (Campo Maior) |
| | Abelterium (Alter do Chão) | Marateca | - | Emerita (Mérida) |
| Itinerários de 1800 | Madalena | Ansião | - | Madalena |
| | Asseiceira | Tomar | - | Pavia |
| | Pavia | Alvaiázere | - | Arraiolos |
| | Tomar | Madalena | - | Asseiceira |
| | Arraiolos | Asseiceira | - | Tomar |
| PR45 | Sertã | Palhota | Porto | Coruche |
| | Orvalho | Amêndoa | Vila Nova de Gaia | Montemor-o-Novo |
| | Vila de Rei | Vila de Rei | Coruche | Fundão |
| | Sardoal | São João do Peso-Cardigos | Leça do Bailio | Alpalhão |
| | Vila Velha de Ródão | Cardigas | Setúbal | Castelo Branco |
| PRN85 | Leiria | Gafanha da Nazaré | Montijo | Coimbra |
| | Pombal | Ílhavo | Setúbal | Leiria |
| | Condeixa | Vagos | Gaia | Condeixa |
| | Fátima | Aveiro | Coimbra | Pombal |
| | Alcanena | Alverca | Barreiro | Coruche |
| PRN2000 | Coimbra - Mealhada | Leça do Balio | Matosinhos - Vila do Conde | Coimbra - Mealhada |
| | Anadia | Infesta - Porto | Maia | Anadia |
| | Condeixa | Gaia | Guimarães | Condeixa |
| | Ansião | Porto | Ermesinde | Ansião |
| | Penacova | Matosinhos | Famalicão | Albergaria-a-Velha |

Tabela 35 – Lugares com maiores valores nas medidas de acessibilidade e de centralidade para as Redes de estradas de Portugal continental.

A análise aos resultados expostos na tabela 35 deve ser feita de duas formas: na horizontal, faz-se uma comparação entre os lugares que permanecem, ou não, entre os 5 de topo na hierarquia estabelecida a partir dos valores das medidas da Teoria dos Grafos e das Redes Complexas; na vertical, podem-se comparar as mudanças ocorridas para as diferentes

redes de estradas, no que se reporta aos lugares mais acessíveis, com maior potencial de interacção e maior grau de intermediação.

Da leitura na horizontal da tabela, conforme se pode verificar pelas células a cor cinza, existem alguns lugares que permanecem no topo da hierarquia das medidas enunciadas, o que é revelador da influência da estrutura da rede face ao território, ou seja à organização e padrão espacial que se formam.

Para as Estradas Romanas, são Ad Septem Aras (Campo Maior) e Emerita (Mérida), são os lugares que se repetem, assinalando também alguma semelhança (porque não são simultaneamente topo da hierarquia de todas as medidas) entre *D* (lugares mais acessíveis) e *B* (lugares por onde mais vezes se tem de passar para nos deslocarmos na rede).

Quando se passa à análise das medidas para a Rede de Itinerários de 1800, a disposição espacial dos lugares sobressai (fruto de uma mais equitativa cobertura do território pela rede) e as semelhanças entre as medidas aumenta, com os lugares Madalena e Asseiceira a permanecerem, ou seja, são simultaneamente os lugares mais acessíveis topologicamente (*D*), dos mais acessíveis fisicamente (*L*) e os que mais vezes intermedeiam as possíveis ligações entre lugares da rede (*B*).

A rede de estradas do PR45 vem reforçar ainda mais as semelhanças entre os resultados obtidos a partir dos modelos isotrópico (*D*) e dos modelos anisotrópico (*L*), com Vila de Rei a permanecer como sendo o 3º lugar mais acessível da rede. Isto significa que a forte conectividade da rede (confirmada pelos indicadores de conectividade atrás referidos) é assegurada sobretudo por relações de vizinhança, isto é, de ligações directas entre vizinhos.

Saliente-se ainda, para a rede do PR45, o facto de o lugar com maior grau de intermediação (*B*), não ser também o mais acessível se acordo com a medida de distância topológica (*D*), nem da medida de distância física (*L*), embora seja um dos lugares que maior poder gravítico revela (*Pi*) e que maior grau de intermediação apresenta. Referimo-nos a Coruche que, fruto da estrutura em malha da rede, boa cobertura do território desta e do facto de haver altos valores de acessibilidade para a maioria dos lugares, assim surge como um lugar de grande influência na facilidade de circulação na rede e do seu grau de eficiência.

Para o PRN85, duas situações merecem referência:

- Ao contrário do verificado para o PR45, em que a estrutura muito equilibrada da rede no território justificava a proximidade espacial entre os lugares mais influentes e atenuava as diferenças entre os resultados das medidas D e L, o que se verifica agora é a permanência de lugares mais acessíveis topologicamente (D) e com maior grau de intermediação na rede (B). A justificação para esta situação decorre, uma vez mais, da mudança na estrutura espacial da rede, e que se traduz por um privilegiar das ligações entre os lugares mais afastados na rede e uma diminuição do peso das relações de vizinhança. Leiria, Pombal e Condeixa permanecem como sendo os mais acessíveis topologicamente e também os que maiores graus de intermediação revelam.
- Tal como verificado para a rede do PR45, um dos lugares com maior poder de interacção é também o lugar que maior grau de intermediação apresenta, e que no caso é Coimbra. Ocorre assim uma mudança espacial, relativamente a PR45, de Coruche para Coimbra, o que evidencia uma política de litoralização da rede, no que respeita aos itinerários principais e complementares.

Para o PRN2000, a leitura da tabela 35 vem agora mostrar que o lugar com maior potencial de interacção denota já não é o lugar que também, maior grau de intermediação apresenta. O retomar do reforço das ligações regionais e consequentemente das relações de vizinhança, faz com que a influência de D e L reassumam importância na rede.

Contudo, como a estrutura da rede não sofreu significativas transformações, como confirmam os resultados das medidas de conectividade da rede (cf. 6.1.) permanece como característica da rede a semelhança de resultados manifestada pelos lugares topologicamente mais acessíveis (D) e os lugares com maior grau de intermediação (B). Coimbra, que no PRN85 era o lugar em destaque, vai continuar a sê-lo, na política rodoviária materializada pelo PRN2000.

Numa síntese, e conhecendo a distribuição dos lugares pelo território, de resto assinalada pelos mapas que foram sendo apresentados nos pontos 6.1., 6.2. e 6.3. deste capítulo, o que sobressai dos resultados obtidos pelas medidas de acessibilidade e centralidade, é uma gradual litoralização dos nós e arcos que compõem a rede e uma deslocação para norte do grupo dos lugares mais acessíveis, mais centrais, com maior grau de intermediação e com maior potencial de interação. Este é de resto um padrão espacial que os resultados das medidas de distribuição territoriais (Tabela 36 e Figura 65) deixam perceber e que se vinha configurando no território já desde as Estradas Romanas.

As Medidas de distribuição espacial (nomeadamente a medida central e da elipse do desvio padrão), que permitem sobretudo resumir as localizações dos lugares (nós) da rede no território, quando confrontadas com as medidas topológicas da rede, permitem confirmar, ou não, tendências de emergência de padrões espaciais.

Relembrando, a medida central é uma função determinada a partir do somatório das distâncias euclidianas (D_e) entre um nó e todos os outros nós. Quanto menor o seu valor, mais central a localização do nó no espaço geográfico. A elipse do desvio padrão vai verificar a existência ou não de uma tendência de distribuição espacial em torno do nó mais central a partir de uma determinada distribuição espacial de nós da mesma natureza.

| | MEDIDAS TERRITORIAIS | MEDIDA TOPOLÓGICA (D) |
|----------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | Nó mais central | Nó mais acessível |
| Romanos | Ponte de Sôr | Ad Septem Aras (Campo Maior) |
| 1800 | Abrantes | Madalena |
| 1945 | Vila de Rei | Sertã |
| 1985 | Ansião | Leiria |
| 2000 | Coimbra | Coimbra-Mealhada |

Tabela 36 – Lugares de maior acessibilidade pelas medidas de distribuição espacial e topológicas, desde as estruturas viárias dos Romanos até ao PRN2000

Assim, numa análise comparativa no tempo entre os lugares que se destacam das medidas enunciadas na tabela 36, o que se verifica é a existência de uma mudança de padrão espacial, guiada pelos lugares mais acessíveis topologicamente e os mais centrais fisicamente, no sentido este – oeste, ou seja no sentido do litoral (cf. Figura 67).

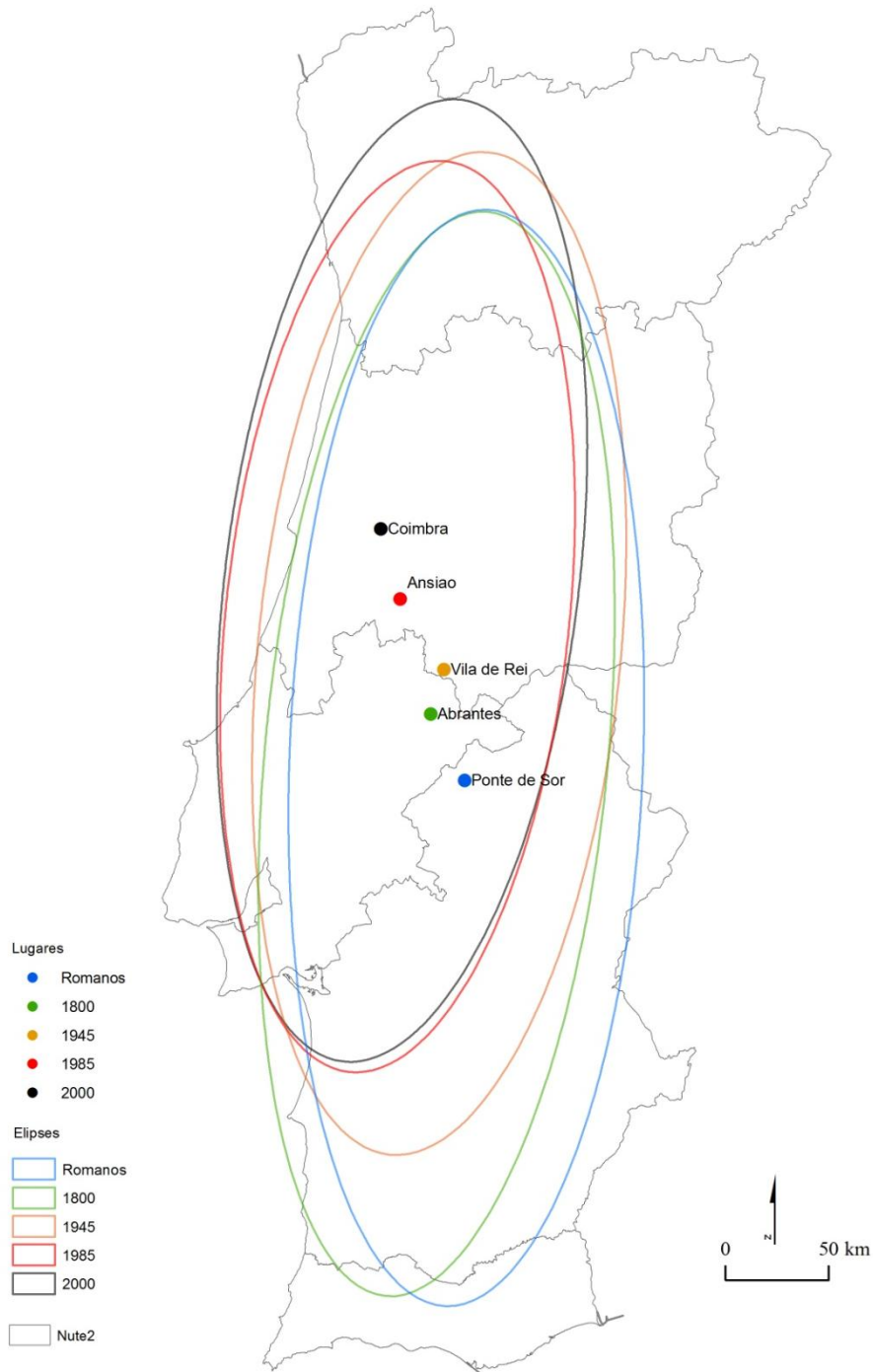


Fig. 67 – Medidas de distribuição espacial: lugares mais centrais e elipses de tendência, para os Grafos das redes de estradas, desde o período Romano ao PRN2000.

Anote-se ainda, para o facto de existir uma alteração tendencial de aproximação espacial entre o lugar mais acessível topologicamente das redes de estradas e o lugar mais central das redes, até à sobreposição espacial. Ou seja, para a rede do PRN2000, o lugar mais

central da rede é também o lugar topologicamente mais acessível da rede. É a estrutura espacial da rede, isto é a sua configuração no território que vai determinar esse padrão, mais precisamente a forma em ‘laço’ da rede do PRN2000, em que Coimbra assume-se como nó, vai ser a principal responsável pelo padrão que o mapa da figura 65 revela.

Sintetizando, de acordo com as medidas topológicas da Teoria dos Grafos, para análise da acessibilidade da rede de estradas constata-se o gradual deslocamento das elipses de desvio padrão, de sueste para noroeste dos lugares mais centrais de acordo com a estrutura da rede. Nota de destaque também para o facto de a Área Metropolitana do Porto estender cada vez mais a sua área de influência, conforme prova a progressiva aproximação dos lugares mais centrais.

Em jeito de conclusões, o que o capítulo 6 da análise aos resultados vem mostrar é que, o modelo *geo_grafo* criado pode constituir um útil instrumento de apoio, tanto para investigadores e académicos, como para agentes que intervêm no território (técnicos e políticos).

7. Considerações Finais

Esta dissertação estruturou-se, para além da introdução e das considerações finais, em cinco capítulos. Nos capítulos, 2, 3 e 4, aos quais se pretendeu imprimir um cariz conceptual e teórico, dissertou-se sobre um estado da arte, uma análise de conceitos, a definição desses conceitos, e a apreciação dos modelos e dos métodos já testados. Nos capítulos 5 e 6, através dos quais se demonstrou que o modelo *geo_grafo* criado se adapta bem à modelação com dados geográficos, fez-se a implementação do modelo e analisaram-se os resultados.

Que relevância apresentam os resultados da dissertação? Esta é a questão à qual responderemos nestas considerações finais.

7.1. A pertinência do modelo: a introdução da componente espacial e a aderência dos resultados à análise geográfica

A análise dos resultados privilegiou a verificação da eficácia do modelo recorrendo à análise do significado geográfico das medidas que devolve. Efectivamente, a informação decorrente da aplicação do modelo (medidas de conectividade e ligação, medidas de acessibilidade e de centralidade, potencial de interacção, coeficiente de *clustering*, ‘Mundo Pequeno’ e medida de Freeman) foi analisada com o intuito de encontrar a sua pertinência para a análise da realidade e interpretação geográfica do território. Tratou-se da verificação da pertinência das medidas resultantes do modelo, ou seja, tratou-se fundamentalmente de verificar se as medidas serviam a análise, mais do

que propriamente a análise geográfica dessas medidas. Ou, dito de outro modo, não se partiu da realidade para chegar à realidade por meio do método, mas sim da concepção do modelo, para chegar ao teste da aderência do modelo à realidade e à verificação da pertinência geográfica dos resultados que devolve.

Do capítulo 2, sobre a Teoria dos Grafos, fica um conhecimento acerca da sua origem e desenvolvimento, dos principais métodos e algoritmos de análise que incorpora, e da sua importância no domínio das ciências geográficas, com destaque para a Geografia Humana. Neste ponto explicou-se ainda como, quando e de que forma se estabeleceu a relação entre a investigação em transportes, os SIG, a Geocomputação e o território, e que originou, o que se chama de SIG-T. Para uns autores, SIG-T é um sub-ramo da Geografia dos Transportes; para outros, um novo domínio científico (CIG-T), interdisciplinar, mas independente e com métodos próprios. Sobre esta temática, o capítulo 4 desta dissertação dá particular atenção.

O capítulo 3 é acerca de uma nova ciência: a ciência das Redes Complexas, e constitui o mais entusiasmante tema de investigação científica deste novo século. Tendo por base a Teoria dos Grafos, as Redes Complexas constituem uma ciência interdisciplinar que procura através das propriedades das redes, como o ‘Mundo Pequeno’, o Coeficiente de *cluster*, os *hubs* e a Lei de Pareto, operacionalizar, representar e compreender quaisquer dos sistemas que nos rodeiam, sob a forma de rede. É no mapa das relações, que os cientistas da actualidade acreditam estarem as respostas para alguns dos problemas que assolam a sociedade actual, nomeadamente da crise económica, passando pelas epidemias e doenças infecto-contagiosas, assim como problemas de índole mais geográfica, nomeadamente a génese e desenvolvimento do sistema de cidades (Batty, 2001).

Foi para provar esta tese que os investigadores, mediante diversa algoritmia, procuraram encontrar respostas para questões como: Como se determina a eficiência da rede? Como se mede o grau de vulnerabilidade da rede? Quais os nós mais importantes da rede? Quais os nós que polarizam a conectividade da rede? A que se deve essa conectividade preferencial por alguns nós? É aleatória ou ordenada a formação e evolução das redes?

O capítulo 4 debruça-se sobre os SIG-T. Neste capítulo disserta-se sobre a importância dos SIG-T para os estudos geográficos, sobre a razão e amplitude dessa importância sublinhando: a origem e evolução dos SIG-T; os modelos de SIG-T e suas características; as funcionalidades desses modelos; as suas principais aplicações e tendências de evolução futura.

A necessidade de se saber mais acerca dos *programas* disponíveis – comerciais e gratuitos -, levou a um conhecimento mais aprofundado acerca das suas características, funcionalidades, vantagens e desvantagens de acordo com as respostas para os problemas que esta dissertação colocava. O estudo dos *programas* existentes, experimentados em ambientes e aplicações muito diversificados, foi essencial para tomar decisões sobre a ideia central desta dissertação.

Trata-se de uma dissertação predominantemente metodológica, com o enfoque na modelação computacional de redes que exigiu a programação até então inexistente. A adopção desta abordagem na dissertação levantou algumas questões fulcrais logo na fase inicial, nomeadamente: 1) devia-se utilizar um *programa* comercial já testado e condicionar a modelação à algoritmia disponibilizada e consequentemente desenvolver mais a componente de análise geográfica dos resultados; ou 2) devia-se criar um *programa* de raiz, com os métodos e o interface gráfico de utilizador? ou 3) se não seria preferível criar um documento com uma sequência de códigos que incorpora-se, simultaneamente, a algoritmia e as ordens de execução, mas sendo hóspede de um *programa* de SIG?

Na realidade, esta terceira opção só surgiu quando já se tinham eliminado as duas anteriores, fruto do trabalho de investigação que resultou no capítulo 4, e que se deveu, de um modo geral, à não integração de funções de análise espacial. Todavia, e de um modo particular, a eliminação das duas primeiras opções ficou a dever-se: 1) ao facto dos *programas* existentes não permitirem a georreferenciação do grafo, como era o caso do *UCINET* e *NETDRAW*; 2) ao facto desses *programas* não permitirem o cruzamento de mais do que uma variável em operações de análise espacial; 3) ao facto de serem programas com um modo de funcionamento vulgarmente designado de ‘caixa-preta’, isto é, que não permitem acesso ao código e não explicam o algoritmo de cálculo (como o caso do *ArcGIS Network Analysis* e o *TransCAD*). Pelas razões referidas esses

programas não se ajustam integralmente nem às exigências de uma *client-driven research* nem tão pouco a uma *curiosity-driven research methodologies* propostas por Wellar (2010).

A programação impôs-se como opção e expõe-se no Capítulo 5. Essa opção ‘desenhou’ parte do perfil da dissertação e o modelo criado (modelo *geo_grafo*), ele próprio objecto de investigação, e sustentou a metodologia de análise de redes. Todo o processo de criação computacional do modelo *geo_grafo* veio revelar-se como a parte mais exigente, mas também a mais aliciante, quer pela aprendizagem a que conduziu quer pela inovação que introduz nos métodos de análise espacial formalizados e implementados em Sistemas de Informação Geográfica.

A passagem de uma situação de utilizador – ainda que experiente e com conhecimentos científicos de base para manusear a informação a partir de um qualquer *programa* de SIG -, a programador capaz de criar um modelo próprio, com capacidade de dar resposta às questões que se vão colocando, significou uma opção orientada para a investigação de índole metodológica. Significou também liberdade científica, que se estendeu desde a escolha e teste da algoritmia à possibilidade de criar novos métodos de análise, mais ajustados ao objecto de estudo e às questões que se iam colocando.

Na fase inicial de manuseamento e de ensaio, quando a opção de programação ainda estava em discussão, testou-se o *programa* gratuito (versão experimental) de redes UCINET e o NETDRAW, uma vez que tinham a vantagem de possuir alguma da algoritmia da Teoria dos Grafos, que interessava. Contudo, havia algumas questões e necessidades não suprimidas, como a georreferenciação da informação (grafo das estradas) que não era contemplada, o que não é compatível com a análise territorial das redes, uma vez que a localização e a distância física são variáveis fundamentais na explicação da dinâmica das redes no tempo.

Um outro aspecto condicionante dos programas em questão era impossibilidade de vectorização das redes pelo *programa*, bem como a construção das matrizes a partir das redes digitalizadas. Este aspecto é tão mais condicionante quanto maior for o número de arcos e nós da rede; acrescia ainda o inconveniente de não disponibilizar a algoritmia utilizada, mas apenas uma explicação do que fazem algumas das

funcionalidades e comandos, o que retira a oportunidade de crítica científico e consequente rigor à investigação. Esta questão era sobretudo delicada pelo facto de existirem, para algumas das medidas da Teoria dos Grafos, mais do que um algoritmo de cálculo.

O TransCAD também foi um *programa* que se considerou usar, contudo a questão de ser 'caixa-preta' e não possuir muita da algoritmia necessária - uma vez que é sobretudo um *programa* T-SIG, ou seja orientado para problemas de transportes e não de análise espacial -, levou ao seu abandono, já que este era um aspecto que deixa o investigador e o utilizador reféns do *programa*.

A opção pela programação tornava-se cada vez mais plausível. Um estágio no Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA) da University College London (UCL), coordenado por Michael Batty e a troca de impressões com colegas e investigadores residentes, bem como com o próprio Michael Batty, foi o que dissipou quaisquer dúvidas quanto à opção de programar, e contribuiu para a redefinição do objecto da dissertação: concepção de um modelo de análise espacial de redes, 'formalização' do modelo e programação.

A escolha da linguagem de programação (LP) obedeceu a dois critérios: a) é uma LP capaz de ser lida por vários *programas*, em particular o *ArcGIS*, que foi o programa de SIG escolhido para servir de hospedeiro; b) é uma LP que se caracteriza por uma relativa facilidade de aprendizagem e de utilização que exige menor experiência. A opção recaiu sobre a LP *Visual Basic for Applications* (VBA).

Em síntese, criou-se um modelo vectorial SIG-T, que pode correr dentro de quaisquer *programas* SIG que aceite VBA. O modelo chamou-se de *geo-grafo*, porque trabalha informação geográfica através de algoritmia de análise de redes, nomeadamente algoritmia proveniente da Teoria dos Grafos (nomeadamente medidas de acessibilidade e centralidade e medidas de conectividade e ligação) e das Redes Complexas (em particular medidas decorrentes do Problema 'Mundo Pequeno').

Esta opção traz para o utilizador um conjunto de vantagens que se traduzem em dois níveis:

- Liberdade técnica – o utilizador tem totais de poderes de edição e manuseamento da informação geográfica a operar, nomeadamente na vectorização da rede, na construção e sua modificação. O facto de o utilizador poder controlar esta funcionalidade, faz com que haja um controle do erro, e um enorme ganho de tempo, já que a construção de matrizes é processada automaticamente pelo modelo *geo_grafo* a partir da rede vectorizada, em vez de ser manual como o exige os *programas* UCINET e NETDRAW;
- Liberdade científica – o facto de ser um programa de código aberto, confere ao modelo *geo_grafo* uma maior flexibilidade no que respeita à sua actualização e aderência à análise da informação geográfica introduzida. Ou seja, ao utilizador e investigador é-lhe sempre permitido acesso ao código e adição de mais algoritmia, ajuste ou subtracção da já existente, consoante o objecto de estudo e a evolução científica o exija.

Em particular, o modelo *geo_grafo* permite, a partir das medidas da Teoria dos Grafos, caracterizar a estrutura da rede de transportes, indicando o grau de conectividade e de coesão da rede, e verificar da maior ou menor acessibilidade de um lugar e sua localização geográfica no território, ao longo do tempo, dando assim indicações da dinâmica espacial determinada pela dinâmica da rede. Estas funcionalidades traduzem-se ainda na capacidade de criar diversos cenários, o que é uma vantagem para o investigador.

No que respeita às medidas das Redes Complexas, o modelo *geo_grafo* vem permitir verificar a presença da propriedade ‘Mundo Pequeno’ (altos índice de clusterização (C_c) e simultaneamente baixo valor de distância média topológica (D_{it})), da rede, ou seja os nós da rede exibem um comportamento de facilidade de relacionamento (é possível ir de um nó para qualquer outro nó da rede) e ao mesmo tempo facilidade de acessibilidade (em poucos arcos, chega-se a qualquer nó da rede).

Apesar de não ser uma propriedade ‘Mundo Pequeno’, a medida de Freeman designada de *Betweenness* (B) das Redes Complexas permite ao analista identificar espacialmente qual o nó pelo qual se tem mais vezes que passar, na deslocação entre nós da rede de estradas, o que contribui, em termos de conhecimento da rede, juntamente com as outras medidas, para uma melhor gestão, um melhor planeamento e mais eficaz tomada de decisão.

Para além das medidas acima citadas, com base tanto da Teoria dos Grafos como das Redes Complexas, criou-se uma outra medida para dar resposta a questões que ainda estavam por responder, nomeadamente a questão decorrente da capacidade de atracção dos nós entre si, e de como isso é ou não determinado pela topologia da rede. Ou seja, será que os nós mais acessíveis da rede são os nós de maior capacidade de atracção? A criação da medida de Potencial de interacção (P_i) da rede permite responder a essa questão.

A medida P_i é uma adaptação do modelo gravítico, com a medida de Shimbel (D) da distância topológica. Tal como está consignado nos domínios da Física e largamente aplicado em estudos geográficos, o potencial gravítico de um qualquer corpo, é directamente proporcional ao peso das suas massas e inversamente proporcional à distância que os separa. Para o modelo *geo_grafo* fez-se uma adaptação, em que se substituiu a variável distância física entre os lugares, por uma distância topológica (D), já que o fenómeno distância física estava já coberto pela análise da matriz L , pretendendo assim obter-se uma percepção mais aproximada da influência da acessibilidade em função da população residente dos lugares, e assim medir o potencial de interacção, para verificar que padrões espaciais se configuram.

A algoritmia para as medidas referidas foi desenhada a partir da criação de um código que se estruturou em 5 partes:

- Main – módulo que tem as declarações que determinam a sequência de operações a realizar;
- CMatrix – módulo onde se definem as operações algébricas necessárias ao cálculo de matrizes;

- **NetworksMXDAnalysis** – módulo-chave, na medida que é a partir dele que se consegue extrair de um conjunto de dados vectoriais (grafo sob a forma de mapa) para a matriz base (C^1), necessária para a construção de todas as outras matrizes, derivada e ponderadas. Este é o módulo que permite dispensar o utilizador da construção da matriz, o que implica não apenas enorme ganho de tempo, como também minimiza prováveis erros nessa construção; sobretudo quando se tratam de grafos com centenas de nós e arcos;
- **Dijkstra** – módulo em que se declara o algoritmo para determinar o caminho-mais-curto entre quaisquer pares de nós;
- **NetworkMatrix** – módulo com as declarações necessárias a calcular os índices de conectividade e acessibilidade e exportá-los sob a forma de ficheiro *.txt, com registos temporais de execução. O módulo tem ainda uma declaração que permite verificar automaticamente o número de sub-grafos existentes num grafo.

A partir destes códigos, o modelo *geo_grafo* criado permite uma análise do efeito estruturante das redes de transportes sobre o território, mediante procedimentos automáticos que permitem uma melhor compreensão da relação entre os sistemas de transporte e o território, cuja escala ou complexidade da rede poderiam, de outra forma, colocá-los fora do alcance de compreensão. O capítulo 6 faz o relato dessa pretensão ao expor os resultados obtidos do ensaio à modelação das redes de estradas de Portugal Continental, operadas a partir do modelo *geo_grafo*.

7.2. As oportunidades de desenvolvimento do modelo: condições para difusão do modelo e criação de novas funcionalidades de análise

Todavia, o modelo *geo_grafo* apresenta limitações. Os resultados revelam a necessidade de desenvolvimentos futuros que podem e devem ser considerados, nomeadamente a continuação de um trabalho de aperfeiçoamento e de desenvolvimento do modelo, tanto no que respeita à algoritmia de análise de redes, com destaque para os algoritmos provenientes das Redes Complexas, por se tratar de uma ciência recente e reconhecida com estando ainda num estado exploratório, e a formulação de uma maior autonomização do modelo, sobretudo no que respeita à necessidade que este ainda

possui de um programa que lhe sirva de hospedeiro.

Quanto às possibilidades que se colocam para difusão do método, não basta que o código criado possa ser lido por muitos dos *programas* SIG disponíveis. Dada a utilidade e importância para a análise de redes, é imprescindível que o modelo possa estar disponível para todos, enquanto um *programa* de uso livre e gratuito com um interface amigável próprio, para que qualquer utilizador menos experiente em computação, mas com interesses de investigação em redes, possa fazer uso. Para concretizar esse objectivo impõe-se a criação de raiz de um *programa*, ou seja, em vez de se estar a usar um *programa* SIG como hospedeiro, se possa programar algumas das funcionalidades de base dos SIG e integrá-las no modelo.

Um outro objectivo para futuros desenvolvimentos, e consequente difusão do modelo, prende-se com um problema que o modelo *geo_grafo* apresenta e que consiste na velocidade de processamento. De forma a tornar-se mais célere, o modelo *geo_grafo* deverá fazer ‘correr’ de forma independente algumas das suas funções. A criação de um programa autónomo, é uma vez mais, uma solução possível, já que um código a correr dentro de um *programa* já existente torna-se sempre mais lento que um *programa* autónomo.

Quanto às condições necessárias para que o modelo adquira maiores capacidades de análise, modelação e cenarização, o facto de ser autónomo e mais flexível, vai ainda permitir ao modelo *geo_grafo* a possibilidade de adquirir uma outra funcionalidade que se considera fundamental e que lhe dará uma maior robustez computacional e acrescida utilidade: a função de simulação, ou seja a de se poder, de uma forma célere e com a mesma precisão e rigor já assegurados, criar cenários hipotéticos e futuros, com base num conjunto de regras. Para este segundo caso, impõe-se a integração de algoritmia de métodos estocásticos, nomeadamente os autómatos celulares e os multi-agentes.

Em suma, o modelo *geo_grafo* tem a pretensão de se afirmar não apenas como um instrumento para apoio à investigação centrada nos métodos, como é o caso desta dissertação, mas também como um instrumento para uma investigação centrada na análise. Esta flexibilidade do modelo confere-lhe também potencial utilitário para a prática do exercício de planeamento e ordenamento territorial, e de apoio à tomada de

decisão fundamentada.

É ainda objectivo do modelo *geo_grafo*, que o seu uso não seja orientado exclusivamente às redes territoriais, como as ensaiadas nesta dissertação, mas que possa estender a sua utilidade na investigação de outras redes, como as redes sociais (as reais ou criadas a partir da internet), económicas, ambientais, aéreas, desportivas ou quaisquer outras cujo sistema possa ser representado sob a forma de grafo, mas sempre com expressão ou influência espacial.

Por fim, uma nota crítica aos resultados. De um ponto de vista estritamente analítico, os resultados finais saídos do modelo *geo_grafo* devolvem perspectivas muito diferentes da realidade em função da configuração da rede, e do número de nós e de arcos. Ou seja, aquando da vectorização da rede, o utilizador deverá ter desde logo um claro entendimento de onde deve quebrar a rede para criar os nós do grafo, uma vez que a não quebra da rede no sítio pretendido, vai originar a não criação de um nó que vai ter implicações nas medidas topológicas e consequentemente na explicação que se poderá retirar acerca das características da rede, nomeadamente na ordenação hierárquica dos nós no que respeita os índices de acessibilidade.

Para o caso desta dissertação, crê-se que a harmonização conceptual dos termos ‘itinerários principais’ e ‘itinerários complementares’ deveria ter sido feito numa fase inicial, já que na análise ao longo do tempo que se fez, o significado dos termos materializava-se no território de forma diferente, isto é, as redes de estradas sofriam alterações que deviam ser conceptualmente consideradas no modelo, para fins comparativos. Ainda que esta harmonização conceptual em nada interfira com a pertinência do modelo em si, a sua não consideração tem implicações nos resultados e na análise da realidade que deles se retira.

Apenas a título de exemplo, note-se que a não integração do nó referente ao lugar ‘Vendas Novas’ no grafo da rede de estradas do PRN 85 (cf. Figura PPP), apenas por não estar contemplado como um itinerário principal (apesar de segundo o PR45 estar), vai implicar uma quebra na relação que a rede tem com os lugares mais para o interior (Évora, Mourão, Beja, entre outros) e consequentemente nas medidas obtidas, e consequentemente na análise da realidade.

Em jeito de conclusão, a importância do modelo *geo_grafo* criado pode ser categorizada em duas facções: uma, mais orientada para os agentes que intervêm no território (técnicos e políticos); e uma segunda facção, mais científica e orientada para os investigadores e académicos.

Da primeira, a importância do modelo criado decorre em larga medida da importância que tem para o Ordenamento do Território (OT), quer na fase de execução das principais figuras de planeamento, quer na fase de tomada de decisão. O facto de não existir um modelo que englobasse todas as medidas contempladas, quer as topológicas da Teoria dos Grafos e das Redes complexas, quer as territoriais, e, simultaneamente, permitisse a georreferenciação e cruzamento de informação a partir de uma Base de Dados é por si só um contributo. No entanto, dadas as propriedades e características que as redes encobrem e que estas medidas vêm revelar, constitui mais um reforço do papel fundamental que conferem ao OT. Com efeito, a noção exacta e devidamente calculada do grau de conectividade e coesão de uma rede, a indicação e identificação espacial e topológica do(s) nó(s) mais acessível(eis), mais central(ais), que mais vezes é atravessado(s) nas deslocações efectuadas na rede e que maior poder de interacção detém, são informações preciosas para quem projecta um plano, assim como para quem tem de tomar decisões que interferem com a acessibilidade e a mobilidade das pessoas, de bens e de informação.

Relativamente à facção mais orientada para os investigadores, também dois ramos podem ser beneficiados com o modelo *geo_grafo*: um ramo composto por aqueles que se dedicam ao desenvolvimento de modelos e aperfeiçoamento da tecnologia; e o ramo composto pelos analistas teóricos. Para os primeiros, o modelo constitui um contributo tecnológico, na medida em que veio preencher uma lacuna (conforme se explicou no Cap. 5), que era a inexistência de um programa que possuísse toda a algoritmia utilizada, ou que não a tendo, permitisse a sua criação. Para os segundos, o modelo é sobretudo um instrumento ‘amigável’, quanto à sua utilização, como resultado da criação de um *plugin* para correr sobre um programa anfitrião mundialmente conhecido dos utilizadores de SIG.

Em suma, o modelo *geo-grafo* tem a pretensão de poder contribuir para um pequeno avanço na investigação geográfica, quer na parte da modelação, quer para a formulação de teorias e a criação de novos conhecimentos acerca das redes.

BIBLIOGRAFIA

AAVV (1995) - *Dictionary of Contemporary English*. Longman group Ltd. Essex

ABREU, D. (2005) - Análise de dados II. Relatório sobre O programa, os conteúdos e os métodos de ensino das matérias da disciplina de Análise de Dados II. Provas para obtenção do título de Professor agregado do Departamento de Geografia da Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Lisboa.

ABREU, D. (2006) - Os Transportes. In Medeiros, C. A. (dir.) *Geografia de Portugal*. Vol. 3, Círculo de Leitores, Lisboa, vol. 3: 333-365.

ALAIN, G. (1995) - *Dicionário prático de matemática*. Terramar, Lisboa.

ALARCÃO, J. (1974) - *Portugal Romano*. 33ª Ed. Coleção Historia Mundi, Ed. Verbo, Lisboa. 273pp

ALARCÃO, J. (1987) - A cidade romana em Portugal. A formação de «lugares centrais» em Portugal, da idade do ferro à romanização. *Cidades e História*: 35-69.

ALARCÃO, Jorge (1990) coord. - Nova História de Portugal, vol. I. Portugal: das origens à romanização. Lisboa, Editorial Presença. 558pp.

ALBERT R.; BARABÁSI, A.-L. (2002) - Statistical mechanics of complex networks. *Review of Modern Physics*, 74: 47-97.

ALEGRIA, M. F. (1990) - *A Organização dos Transportes em Portugal (1850-1910)*. CEG, Lisboa.

ALLAIN, R. (2004) - *Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand Colin, Genève.

ANDREY, J.; RODRIGUE, J.-P. (2009) – Methods in Transport Geography. In *The Geography of Transport Systems*, Hofstra University, Department of Global Studies & Geography, <http://people.hofstra.edu/geotrans>.

ANSELIN, L. (1998) - Exploratory spatial data analysis in a geocomputational environment. *Proceedings of the 3rd International Conference on Geocomputation '98*, Bristol, UK.

ARMSTRONG, M. (2000) - Geography and Computer Science. *Annals of the Association of American Geographers*, 90(1):146-156.

ASCHER, F. (2001) - *Les nouveaux principes de l'urbanisme*. Editions de l'Aube, Paris.

BAILLY, A. (1988) – Geography of Transportation: a behavioural approach. La geografia española y mundial en los años ochenta, Universidad Complutense, Madrid:

237-245.

BALARKRISHNAN, V. (1997) – Theory and Problems of Graph Theory. Schaum's Outline Series. McGraw-Hill. New York.

BARNES, J.; HARARY, F. (1983) – Graph Theory in Network Analysis. Social Networks, vol. 5(2):235-244.

BANGER, S. (2002) - Geocomputation: A technique for spatial analysis. *GIS@development*, October 2002. [Acedido em 26 de Junho de 2006]. <http://www.gisdevelopment.net/magazine/gisdev/2002/oct/gctsa2.shtml>.

BARABÁSI, A. L. (2003) - *Linked. How everything is connected to everything else and what it means for business, science, and everyday life*. Plume, New York.

BATTY, M. (2001) - Cities as small worlds. *Environment and Planning B: Planning and Design* 28: 637-638.

BATTY, M. (2003) - *Network geography*. Working papers, 63, CASA, London.

BATTY, M. (2005) - *Cities and complexity. Understanding cities with cellular automata, agent-based models and fractals*. MIT Press, London.

BEAVERSTOCK, J.; SMITH, R.; TAYLOR, P. (2000) - World-City Network. A New Metageography? *Annals of the Association of American Geographers*, 90: 123-134.

BERRY, B.; MORRIL, R.; TOBLER, W. (1964) - Geographic Ordering of Information: New opportunities. *The Professional Geographer*, 16 (4): 39-44.

BERRY, B.; MARBLE, D. (1968) - *Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography*. Prentice-Hall Inc., New Jersey.

BERSINI, H. (2005) - *Des réseaux et des sciences. Biologie, informatique, sociologie: l'omniprésence des réseaux*. Vuibert, Paris.

BERTALANFFY, L. (1950) – An Outline of General System Theory. The British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 1, N°2 :134-165.

BLACK, W. R. (2003) - *Transportation. A Geographical Analysis*. The Guilford Press, New York.

BRUNET, R. (1996) - L'Europe des réseaux. In Pumain, D.; Saint-Julien, T. (ed.) *Urban Networks in Europe: Réseaux Urbains en Europe*. France. John Libbey Eurotext: 131-150.

BRUNET, R. (2001) - Models in geography? A sense to research. *Cybergeog: European Journal of Geography*. 12th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography, St. Valery-en-Caux, France.

- BURROUGH, P. (1989) - Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of soil science*, 40: 477-492.
- BURTON, I. (1963) - The Quantitative Revolution and Theoretical Geography. *In Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography*. Prentice-Hall, New Jersey: 13-23.
- CAMPOS, L.; VILAR, S.; LEVI, L. (1999) - *Programação em Visual Basic 6*. FCA, Lisboa.
- CAMPOS, L. (1995) - *Dicionário de computadores*. 2ª Ed., Editorial Presença, Lisboa.
- CARAÇA, J. (2005) - *Conceitos fundamentais da matemática*. Gradiva, Lisboa.
- CARDILLO, A. *et al* (2006) - Structural properties of planar graphs of urban street patterns. *Physical Review E*, 73: 1-8.
- CASTELLS, M. (2002) - *A Sociedade em rede. A era da informação: economia, sociedade e cultura*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- CASTELLS, M. (2004) - *A galáxia internet. Reflexões sobre a internet, negócios e sociedade*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- CHISHOLM, Michael, (1967). General Systems Theory and Geography. *In Transactions of the Institute of British Geographers*, N°42; pp. 45-52. JSTOR
- CHORLEY, R. (1964) - Geography and Analogue Theory. *Annals of the Association of American Geographers*, 54(1): 127-137.
- CHORLEY, R.; HAGGET, P. (ed.) (1967) - *Models in Geography*. Methuen & Co. Ltd. London.
- CHORLEY, R.; HAGGET, P. (1967) - Models, Paradigms and the New Geography. *In Chorley, R.; Hagget, P. (ed.) Models in Geography*. Methuen & Co., Ltd. London: 19-4.
- CHORLEY, R.; HAGGET, P. (1969) - *Network Analysis in Geography*. Edward Arnold, London.
- CORTESÃO, J. (1964) - *Os factores democráticos na formação de Portugal*. Livros Horizonte, Lisboa.
- COSTA, N. (2007) - As alterações da acessibilidade e da mobilidade: uma função da velocidade. *In CEG (ed.) Geophilia. O sentir e os sentidos da Geografia*. CEG, Lisboa: 155-169.
- COSTA, N. (2007) - *Mobilidade e Transporte em Áreas Urbanas. O caso da Área Metropolitana de Lisboa*. Dissertação de doutoramento em Geografia Humana, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- DIESTEL, R. (2005) - *Graph Theory*. Electronic version of the third Edition, Springer. New York.

DOROGOVTSSEV, S.; MENDES, J. (2003) - *Evolution of Networks. From biological nets to the internet and WWW*. Oxford University Press, New York.

DU, G. (2001) - Using GIS for Analysis of Urban Systems. *Geojournal* 52: 213-221.

EHLEN, J.; DOUGLAS, C. (2002) - Geocomputation: What is it? *Computers, Environment and Urban Systems*, 26: 257-265.

FEDERAL INTERAGENCY COORDINATING COMMITTEE ON DIGITAL CARTOGRAPHY (1988), GUPTIL, S. Ed. – A Process for Evaluating Geographic Information Systems. U. S. Department of the Interior. U. S. Geological Survey. Denver Colorado: 88-105.

FERNANDES, F. (2008) - *O Efeito das Infra-estruturas rodoviárias no Ordenamento e Desenvolvimento do Território: O caso da Ilha de Santiago, Cabo Verde*. Dissertação de Mestrado em Gestão do Território, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

FISHER, M. (2003) - GIS and Network Analysis. In Hensher D., et al (eds.) *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*. Pergamon, Oxford, vol. 5: 391-408.

FORESMAN, T. (ed.) (1998) - *The History of Geographic Information Systems. Perspectives from the Pioneers*. Prentice Hall, New Jersey.

FOTHERINGHAM, A. S.; BRUNDSON, C.; CHARLTON, M. (2002) - *Quantitative Geography. Perspectives on Spatial Data Analysis*. SAGE Publications Inc., California.

FREEMAN, L. C. (1977) – A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*, vol. 40 (1):35-41.

Gabinete da Área de Sines (1973) – Plano Geral da Área de Sines. Presidência do Concelho. Lisboa. 579pp.

GAHEGAN, M. N. (1999) - What is Geocomputation? *Transactions in GIS* 3: 203-206.

GALEANA, Ó. (2004) - *Análisis espacial del transporte aéreo de carga en México*. Instituto mexicano del transporte, Querétaro.

GARRISON, W. (1960) - Connectivity of the Interstate Highway System. In *Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography*. Prentice-Hall, New Jersey: 239-249.

GARRISON, W.; MARBLE, D. (1961) - *The Structure of Transportation Networks*. U.S. Department of Commerce, Office of Technical Services, Washington D.C.

GASPAR, Jorge (1970) – Os Portos Fluviais do Tejo. FINISTERRA. Revista Portuguesa de Geografia. Vol. V, nº10. Lisboa. Centro de Estudos Geográficos:153-204.

GASPAR, Jorge (1981) - *A área de influência dos lugares centrais de Évora. Sistema de funções e lugares centrais*. CEG, Lisboa.

GASPAR, Jorge *et al.* (1984) - Um poliedro complexo: olhar sobre a estrutura científica do Centro de Estudos Geográficos. In CEG (ed.) *Livro de homenagem a Orlando Ribeiro*. CEG, Lisboa: 37-58.

GASPAR, Jorge (1998) - Nós e os Outros. *InforGeo. A Interdisciplinaridade na Geografia Portuguesa: Novos e Velhos Desafios*, 12-13: 3-10.

GASPAR, Jorge (2005) - 45 Anos de Geografia. *Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia*, 40(79): 35-46.

GASPAR, Jorge; JENSEN-BUTLER, C.; JEPPESEN, S. (1986) - Telecomunicações e desenvolvimento regional em Portugal: um projecto para a região Centro. *Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia* 21(41): 5-56.

GASPAR, Jorge; RODRIQUEZ, J. (2006) - As Redes de Transportes e de Telecomunicação. In Medeiros, C. A. (dir.) *Geografia de Portugal*. Círculo de Leitores, Lisboa, vol. 4: 59-83.

GASPAR, Joaquim (2004) – Dicionário de Ciências Cartográficas. Lidel. Lisboa. 327pp.

GASTNER, M.; NEWMAN, M. (2006) - The spatial structure of networks. *The European Physical Journal B* 49: 247-252.

GORMAN, S; KULKARNI, S.; (2003) - Spatial Small Worlds: New Geographic Patterns for an Information Economy. *Environment and Planning B*: 1-55 (prelo)

GOULD, P. (1991) - Dynamic Structures of Geographic Space. In Brunn S. D.; Leinbach, T. R. (ed.) *Collapsing Space and Time: Geographic Aspects of Communication and Information*. Harper Collins, London: 3-30

GRAHAM, S.; MARVIN, S. (2001) - *Splintering urbanism. Networked infrastructures, technological mobilities and the urban condition*. Routledge, London.

GRAHAM, S. (2004) - *The cybercities*. Routledge, London.

GRANOVETTER, M. (1983) - The Strength of Weak Ties. A Network Theory Revisited in *American Sociological Association*, vol. 1:201-233.

GRIBKOVSKAIA, I. *et al* (2007) - The Bridges of Königsberg - A Historical Perspective. *Wiley InterScience*.

GRUEAU, C. (1994) - *Mise en Ouvre d'un Système d'Information Géographique pour la gestion municipale: Réalisation d'un prototype environnemental pour la ville de Lisbonne*. Rapport de Stage, Lisboa, CNIG.

HAGGETT, P. (1965) - *Locational Analysis in Human Geography*. Edward Arnold Pub, London.

- HAGGETT, P. (1967) - Network Models in Geography. In Chorley, R., Hagget, P. (ed.) *Models in Geography*. Methuen & Co., Ltd., London: 609-668.
- HAGGETT, P. (2001) - *Geography. A global synthesis*. Prentice Hall, Harlow.
- HAGERSTRAND, T.; GASPAR, J. (1969) - O momento actual da Geografia Humana na Suécia. *Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia* (separata), 5(7).
- HALL, P. (1992) - *Urban & Regional Planning*. Routledge, London.
- HALL, P. (2002) - *Cidades do Amanhã*. Editora Perspectiva, São Paulo.
- HAYES, B. (2000) - Graph theory in practice: part I. *American Scientist*, 88: 9-13.
- HAYNES, K.; FOTHERINGHAM, S. (1984) - *Gravity model overview, Gravity and Spatial Interactions Models*. Sage, California.
- HENSHER, *et al* [Ed. (2004)] – Handbook of Transport Geography and Spatial Analysis. Handbooks in Transport, vol. 5. UK:677pp.
- INE (2001) - Manual de Procedimentos da Construção da Base Geográfica de Referenciação de Informação de 2001. Lisboa. INE.
- JAMES, G.; CLIFF, A.; HAGGETT, P.; ORD, J. (1970) - Some Discrete Distributions for Graph with Applications to Regional Transport Networks. *Geografiska Annaler, Series B, Human Geography*, 52(1): 14-21.
- JIANG, B. (2006) - Small World Modeling for Complex Geographic Environments, 259-271. In *Complex Artificial Environments: Simulation, Cognition and VR in the Study and Planning of Cities*. Springer. Heidelberg: 259 - 271.
- KANSKY, K. (1963) - *Structure of Transportation Networks: Relationships Between Network Geometry and Regional Characteristics*. Research paper, 84, Department of Geography, University of Michigan, Michigan.
- KANSKY, K.; DANSCOINE, P. (1989) - Measures of Network Structure. *Flux* 1: 89-121.
- KAO, R. (1963) – The Use of Computers in the Processing and Analysis of Geographic Information. *Geographical Review*, Vol.53, N°4:530-547.
- KIM, B. J. *et al.* (2002) – Path Finding Strategies in Scale-free Networks. *Physical review E*, vol. 65, 027103:4pp.
- KUBY, M.; TIERNEY, S.; ROBERTS, T.; UPCHURCH, C. (2005) - *A Comparison of Geographic Information Systems, Complex Networks, and Other Models for Analyzing Transportation Network Topologies*. N. C. report, NASA, Hannover.
- LAURINI, R. (2001) - *Information systems for urban planning. A hypermedia co-operative approach*. Taylor & Francis, London.

- LAY, M. (2005) - The history of transport planning. In Button K. J.; Hensher D. A. (ed.) *Handbook of Transport Strategy, Policy and Institutions*, Elsevier.
- LEMA, P. (1980) - *Desenvolvimento das funções centrais em Trás-os-Montes*. Dissertação de doutoramento em Geografia Humana, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- LILLESAND, T.; KIEFER, R. (1994) – *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3ª Ed., John Wiley & Sons. New York
- LO, C.; YEUNG, A. (2002) - *Concepts and techniques of Geographic Information Systems*. Keith Clarke (Ed.). Prentice Hall Series in Geographic Information Science, Prentice Hall, New Jersey: 492pp.
- LLOYD-EVANS, S.; ROBERT, B. (1998) - *The city in the developing world*. Longman, Harlow.
- LOBATO, L. et al. (Coord.) (2005) - *A Concepção da Rede Ferroviária no Sistema Global de Transportes*. CP, DGTTF, Lisboa.
- LONGLEY, P.; BORKKS, S.; MCDONNELL, R.; MACMILLIAN, B. (1998) - *Geocomputation. A primer*. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex
- LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (2001) - *Geographic information systems and science*. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex.
- MARQUES, O.; DIAS, J. (2003) - *Atlas Histórico de Portugal e do Ultramar Português*. Centro de Estudos Históricos da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- MATOS, A. T. (1980) - *Transportes e comunicação em Portugal, Açores e Madeira (1750-1850)*. Universidade dos Açores, Ponta Delgada.
- MATOS, J. (2000) - *Fundamentos da Informação Geográfica*. Lisboa, LIDEL.
- MATTOSO, J. (Coord) (1993) - *Os recursos e os poderes. História de Portugal. Antes de Portugal*. Ed. Estampa, Lisboa, vol. 1: 385-394.
- MERCHANT, D. C. (1987) – Spatial Accuracy Properties of Nature Drainage Systems and their Representation in a E4 Phase Space, *Journal of Geology*, 66 (1):33-56.
- MERENNE, E. (2003) - *Géographie des transports*. Presses Universitaires des Rennes, Rennes.
- MILGRAM, S. (1967) - The small-world problem. *Psychology. Today*, 2: 60-67.
- MILLER, H.; SAHAW, S. (2001) - *Geographic information systems for transportation. Principles and applications*. Oxford university press, New York.

- MILLER, H. J. (1999) - Potential contributions of spatial analysis to geographic informations systems for transportation (GIS-T). Forthcoming in *Geographical Analysis* (30th anniversary issue).
- MINISTÉRIO DAS CIDADES, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E AMBIENTE (2005) - *Programa Nacional das Políticas de Ordenamento do Território*. DGOTDU, Lisboa.
- MITCHELL, A. (2005) - *The ESRI Guide to GIS Analysis*. ESRI Press, Redlands, California, vol. 2.
- MITCHELL, W. - (2000) *e-topia*. MIT, Massachusetts.
- MITCHELL, W. (2004) - *ME++ The cyborg self and networked city*. MIT, Massachusetts.
- MORIN, E. (2008) - *Introdução ao Pensamento Complexo*. 5^a Ed, Instituto Piaget, Lisboa.
- MUN, S.-I. (1997) - Transport network and system of cities. *Urban economics*, 42: 205-221.
- NEGROPONTE, N. (1996) - *Ser Digital*. Caminho, Lisboa.
- NEWMAN, M. (2003) - The structure and function of complex networks. *SIAM Review* 45:167-256.
- NEWTON-SMITH, W. H. (2005) - *Lógica. Um curso introdutório*. Gradiva, Lisboa.
- NIJKAMP, P. (1978) - Gravity and Entropy Models. The State of the Art. *Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*, University of Amsterdam, Hague,
- NYSTUEN, J.; DACEY, M. (1961) - A Graph Theory Interpretation of Nodal Regions. In *Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography*. New Jersey. Prentice-Hall: 407-418.
- NYSTUEN, J. (1963) - Identification of Some Fundamental Spatial Concepts. In *Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography*. New Jersey. Prentice-Hall: 35-41.
- ODUM, E. (1988) - *Fundamentos de Ecologia*. 4^aEd., Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.
- ONO, H.; MURAYAMA, Y. (2003) - Development of integrated spatial analysis systems using open sources. *Proceedings of the 7th International Conference on Geocomputation' 2003*. Southampton, UK.
- OPENSHAW S.; ABRAHART, R. (1996) Geocomputation. *Proceeding 1st International Conference on Geocomputation*. University of Leeds, UK.

- OPENSHAW, S. (2000) - Geocomputation. In Openshaw, S.; Abrahart, R. (ed.) *Geocomputation*. Taylor&Francis, London: 1-31.
- OPENSHAW, Stan *et al.* (2000) - Geocomputation research agendas and future. In Openshaw, S.; Abrahart, R. (ed.) *Geocomputation*. Taylor&Francis, London: 388-407.
- O'SULLIVAN, D. B. (2000) - Graph-based cellular automaton models of urban spatial processes. Tese de doutoramento. University College of London. London.
- PARK, R. E. (1999) - *La ciudad y otros ensayos de ecología urbana*. Ediciones del Serbal, Barcelona.
- PENG, Z.-R.; TSOU, M.-H. (2003) - *Internet GIS. Distributed Geographic Information Services for the Internet and Wireless Networks*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- PEETERS, D. *et al* (1998) - Transportation networks and the location of human activities. *Geographical Analysis*, 30 (4): 355-371.
- POTRYKOWSKI, M.; TAYLOR, Z. (1982) - *Geografía del Transporte*. Ariel, Barcelona.
- PUMAIN, D. ; SAINT-JULIEN, T. (Ed.) (1996) - *Urban Networks in Europe/ Réseaux Urbains en Europe*. France. John Libbey Eurotext.
- PUMAIN, D. (2001). Opening Plenary: Communicating about Theoretical Geography. *Cybergeo: European Journal of Geography*. 12th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography. St-Valery-en-Caux. France.
- RAMOS, P. (2007) – *Desenhar Bases de Dados com UML*. 2ª Ed. Edições Sílabo. Lisboa. 251pp.
- RIBEIRO, O. (1989) - *Opúsculos Geográficos. Síntese e Método*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- ROCHA, J.; MORGADO, P. (2007) - A Complexidade em Geografia. In CEG (ed.) *Geophilia. O sentir e os sentidos da Geografia*. CEG. Lisboa: 137-153.
- RODRIGUE, J-P *et al.* (2009) - *The Geography of Transport Systems*, Hofstra University, Department of Global Studies & Geography, <http://people.hofstra.edu/geotrans>.
- ROSE, A. (2001) - *Uma avaliação comparativa de alguns Sistemas de Informação Geográfica aplicados aos Transportes*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Brasil.
- SALGUEIRO, T. (2005) – Cidades e Sistema Urbano. In Medeiros, C. A. (dir.) *Geografia de Portugal*. Sociedade, Paisagens e Cidades. Círculo de Leitores, Lisboa, vol. 2: 176-189.
- SANTA-RITA, A. J. (2006) - *As Estradas em Portugal. Da Monarquia ao Estado-Novo (1900-1947)*. Edições Universitárias Lusófonas, Lisboa.

SARGENT, R. (2005) - Validation and verification of simulation models. *Proceedings of the 1999 Winter simulation conference*. Orlando, Florida: 130-143.

SHAW, S.-L.; RODRIGUE, J.-P. (2009) – Geographic Information System for Transportation. In *The Geography of Transport Systems*, Hofstra University, Department of Global Studies & Geography, <http://people.hofstra.edu/geotrans>.

SHIMBEL, A. (1953) - Structural parameters of communication networks. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 15: 501-507.

SILVA, A.; ROSE, A.; RODRIGUES, D. (2003) - An Assessment method for GIS-T software. *International conference on computers in urban planning and urban management*, 8, Sendai.

SILVA, H. (2009) - *Perfil Nacional de Metadados para Informação Geográfica (Perfil MIG)*. SNIG, IGP, Lisboa.

SIMÕES, J. (2006) - An Agent-Based-Approach to Spatial Epidemics through GIS. Tese de Doutorado, UCL, University of London.

STEFANOVIC, P.; DRUMMOND, J.; MULLER, J. P. (1989) - It's Response to the Need for Training in CAL and GIS, *International Seminar Proceedings*, Dehra Dun, INCA:450 - 460.

STROGATZ, S. (2001) - Exploring complex networks. *Nature*, 410: 268-276.

SUI, D. (2004) - Tobler's first law of geography. A big idea for a small world? *Annals of the American Association of Geographers*, 94: 269-277.

TAAFFE, E. (1962) - The Urban Hierarchy: An air passenger definition. *Economic Geography*, 38(1): 1-14.

TAAFFE, E.; MORRIL, R.; GOULD, P. (1963) - Transport Expansion in Underdeveloped Countries: A Comparative Analysis. *Geographical Review*, 53(4): 503-529.

TAAFFE, E.; MORRIL, R.; GOULD, P. (1973) - Transport Expansion in Underdeveloped Countries: A comparative analysis (shortened version of the study published in 1963). In Hoyle (ed.) *Transport and Development*. Geographical Readings. Macmillan Press, London: 32-49.

TAAFFE, E.; GAUTHIER, H. (1973) - Geography of Transportation. In *Foundations of Economic Geography Series*. Englewood Cliffs. Prentice Hall

TAAFFE, Edward; GAUTHIER, Howard; O'KELLY, Morton. (1996). *Geography of Transportation*. Second Edition. New Jersey. Prentice Hall.

TAYLOR, P. (2004). *World city network. A global urban analysis*. Routledge, New York.

TENEDÓRIO, J. *et al* (2006) - Modelos Geográficos e sistemas complexos. Técnicas de geocomputação aplicadas à previsão de alterações de linha de costa. Actas do ESIG 2006. USIG, Oeiras, Portugal.

THOMAS, I. (2002) - *Transportation networks and the optimal location of Human activities. A numerical geography approach*. Edward Elgar, Cheltenham.

TOBLER, W. (1970) - A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography. Proceedings of the International Geographical Union. Commission on Quantitative Methods*, 46: 234-240.

TOBLER, W. (1976) - Spatial Interaction Patterns. *Journal of Environmental Systems*, 6, (4): 271-301.

TORRENS, P.; BENENSON, I. (2004) - Geosimulation. Automata-based modeling of urban phenomena. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex.

TRAVERS, J.; MILGRAN, S. (1969) - An Experimental Study of the Small World Problem. *Sociometry*, 32 (4): 425-443.

TSAKIRIS, G.; *et al* (1994) – *Accuracy Issues of Geographic Data and Processes for Estimating Water Resources Availability*. In Tsakiris e Santos (Ed.), *Advances in Water Resources Technology and Management*, Ewra, A. A. Balicema, Rotterdam: 9-13.

TUCKER, A. (2001) - *Applied Combinatorics*. 4th Ed. John Wiley & Sons.

TRUDEAU, R. (1993) – *Introduction to Graph Theory*. Dover Publications, Inc. New York.

VAREJÃO, F. (2004) - *Linguagens de programação. Conceitos e técnicas*. Elsevier, Rio de Janeiro.

WATTS, D.; STROGATZ, S. (1998) - Collective Dynamics of ‘Small-world’ networks. *Nature*, 393: 440-442.

WATTS, D. (2004) - *Six degrees. The science of a connected age*. Vintage, London.

WATTS, D. (2006) - *Seis grados de separación. La ciencia de las redes en la era del acceso*. Paidós, Barcelona.

WELLAR, B. (2010) – Significant Advances in Applied Geography from Combining Curiosity-driven and Client-driven Research Methodologies. *International Journal of Applied Geospatial Research*. IGI Global. Vol.1, Issue 1.

WILSON, A. (1997) - Land-use/Transport Interaction Models. Past and Future. *Journal of Transport Economics and Policy*, 32: 3-23

WILSON, A. (2000) - *Complex spatial systems. The modeling foundations of urban and regional analysis*. Prentice Hall, Harlow.

WILSON, R. (1987) - *Introduction to graph theory*. Longman Scientific & Technical, New York.

WORBOYS, M. (1998) - *GIS. A Computing Perspective*. Taylor & Francis, London.

XIE, F.; LEVINSON, D. (2006) - Measuring the Structure of Road Networks. *Geographical Analysis*, 39 (3): 1-30.

XU, Z. (2007) - *Small-World Characteristics in Geographic, Epidemic, and Virtual spaces: A Comparative Study*. Tese de Doutorado, Office of Graduate Studies of Texas A&M University, Texas.

XU, Z.; SUI, D. (2007) – Small-world Characteristics on Transportation Networks: A Perspective from network autocorrelation In *Journal of Geographical Systems*, vol. 9:189-205.

ZHAN, B. (1998) - Shortest paths algorithms: An evaluation using real road networks. *Transportation Science*, 32 (1): 65-73.